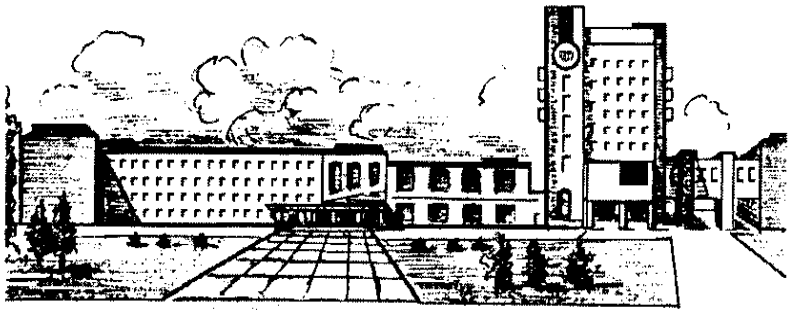
ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 3(41)

65
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Чернігів 2025

УДК 62:67.05
Т38
DOI: 10.25140/2411-5363-2025-3(41)

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 10 від 27.09.2025 р.). Науковий журнал «Технічні науки та технології» внесено до переліку наукових фахових видань України, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки України від 11.07.2019 р. № 975 (зі змінами від 09.02.2021 № 157), відповідно до якого журналу надано категорію «Б».

Технічні науки та технології : науковий журнал / Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів : НУ «Чернігівська
Т38 політехніка», 2025. – № 3(41). – 526 с.

У журналі вміщено статті, присвячені теоретичним та експериментальним дослідженням у науковому напрямі «Технічні науки» за спеціальностями: прикладна механіка, матеріалознавство, машинобудування, інформаційно-комп'ютерні технології, електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, хімічні та харчові технології, будівництво та геодезія. Статті прорецензовані провідними вченими у відповідних галузях знань.

Журнал «Технічні науки та технології» буде корисним для науковців, науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та студентів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

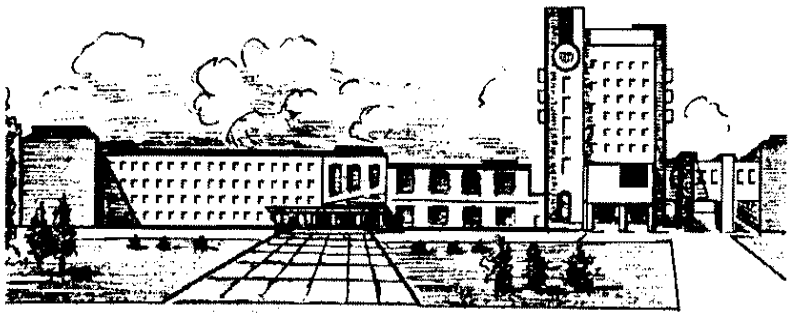
УДК 62:67.05

Головний редактор:
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка».
Заступник головного редактора:
Болотов М. Г., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Члени редакційної колегії:
Прикладна механіка, матеріалознавство та машинобудування
Бойко С. В., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Дмитрієв Д. О., доктор технічних наук, професор, Херсонський національний технічний університет;
Єрошенко А. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Кальченко В. І., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Марков О. Є., доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія;
Новомлинець О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Охріменко О. А., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Пилипенко О. І., доктор технічних наук, професор, почесний член редколегії;
Повстяной О. Ю., доктор технічних наук, доцент, Луцький національний технічний університет;
Сапон С. П., кандидат технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Сіра Н. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Федориненко Д. Ю., доктор технічних наук, професор, Tohoku University, Японія;
Ющенко С. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Michał Bembenek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).
Інформаційно-комп'ютерні технології
Азаров О. Д., доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет;
Дорош М. С., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Єременко В. С., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Зайцев С. В., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Казимир В. В., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Криворучко О. В., доктор технічних наук, професор, Національний університет біоресурсів і природокористування України;
Мелешко Є. В., доктор технічних наук, професор, Центральноукраїнський національний технічний університет;
Павленко П. М., доктор технічних наук, професор, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;
Семенов С. Г., доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;
Цюцюра С. В., доктор технічних наук, професор, Державний торговельно-економічний університет.
Енергетика, електротехніка та електромеханіка
Вінніков Д., доктор технічних наук, професор, Таллінський університет технологій (Естонія);
Волков І. В., доктор технічних наук, професор, Інститут електродинаміки НАН України;
Галкін І., доктор технічних наук, професор, Ризький технічний університет (Латвія);
Гусев О. О., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Денисов Ю. О., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Приступа А. Л., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Ромеро-Кадавал Е., доктор технічних наук, професор, Університет Естремадури (Іспанія);
Степенко С. А., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Хімічні та харчові технології
Антонюк І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, Державний торговельно-економічний університет;
Буяльська Н. П., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Гуменюк О. Л., кандидат хімічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Дударєв І. М., доктор технічних наук, професор, Луцький національний технічний університет;
Звірко О. І., доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України;
Плаван В. П. доктор технічних наук, професор, Київський національний університет технологій та дизайну;
Самохвалова О. В., кандидат технічних наук, професор, Харківський державний університет харчування та торгівлі;
Сиза О. І., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка;
Трус І. М., доктор технічних наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського;
Цибуля С. Д., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Челябієва В. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».
Будівництво та геодезія
Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Крячок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Паляниця Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;
Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;
Сахно Є. Ю., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;
Терещук О.І. кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;
Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Університет нафти та мінералів імені короля Фахда, Міждисциплінарний науково-дослідний центр авіаційних та космічних досліджень, керівник лабораторії дистанційного зондування та аналізу, Саудівська Аравія;
Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.

© НУ «Чернігівська політехніка», 2025

ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
CHERNIHIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY



TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 3(41)

65
CHERNIHIV POLYTECHNIC
NATIONAL UNIVERSITY

Chernihiv 2025

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2025-3(41)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 10 dated 27.09.2025). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

Technical sciences and technologies : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2025. – № 3(41). – 526 p.

This journal contains articles devoted to theoretical and experimental research in the scientific direction "Technical Sciences" by specialties: applied mechanics, materials science and machine building, information and computer technologies, electric power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering, chemical and food technologies, construction and geodesy. The articles are reviewed by leading scientists in relevant fields of knowledge.

Journal "Technical sciences and technologies" will be useful for the scientific and technical workers, postgraduates, master students and students of higher technical educational establishment.

UDC 62:67.05

Editor in chief:
Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University.
Deputy Editor in chief:
Bolotov M.G., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University.
Members of the Editorial Board:
Applied mechanics, materials science and machine building
Boyko S.V., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Dmytriiev D.O., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kherson National Technical University;
Yeroshenko A.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Kalchenko V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Markov O.Ye., Doctor of Technical Sciences, Professor, Donbaska derzhavna mashynobudivna akademiia;
Novomlynets O.O., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Okhrimenko O. A., Doctor of Technical Sciences, Professor; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Pilipenko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Member of the Editorial Board;
Povstianoi O.Yu., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Lutsk National Technical University;
Sapon S.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Sira N.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Fedorynenko D.Yu. Doctor of Technical Sciences, Professor, Tohoku University, Japan;
Yushchenko S.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Michał Bembenek, Doctor of Engineering Sciences, Professor, AGH University of Krakow (Krakow, Poland).
Information and computer technologies
Azarov O.D., Doctor of Technical Sciences, Professor, Vinnytsia National Technical University;
Dorosh M.S., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University»;
Yeremenko V.S., Doctor of Technical Sciences, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Zaitsev S.V., Doctor of Technical Sciences, Chernihiv Polytechnic National University.
Kazymyr V.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Kryvoruchko O.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Life Resources and Environmental Management of Ukraine;
Meleshko Ye.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Central Ukrainian National Technical University;
Pavlenko P.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, State University "Kyiv Aviation Institute";
Semenov S.H., Doctor of Technical Sciences, Professor, Semyon Kuznets Kharkiv National Economic University;
Tsiutsiura S.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, State Trade and Economic University.
Power engineering, electrical engineering and electromechanical engineering
Vinnikov D., Doctor of Science, Senior Researcher, Head of Power Electronics R&D Group, Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia;
Volkov I.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine;
Galkin I., Doctor of Science, Professor, Riga Technical University, Riga, Latvia;
Husev O.O., PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Denysov Yu.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Prystupa A.L., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Romero-Cadaval E., Doctor of Science, Professor, University of Extremadura, Badajoz, Spain;
Stepenko S.A., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.
Chemical and food technologies
Antoniuk I.Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, State University of Trade and Economics;
Buialska N.P., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Gumeniuk O.L., PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Dudarev I.M., Doctor of Technical Science, Professor, Lutsk National Technical University;
Zvirko O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine;
Plavan V.P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Technologies and Design;
Samokhvalova O.V., PhD in Technical Sciences, Professor, Kharkiv State University of Food Technology and Trade;
Syza O.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Taras Shevchenko National University «Chernihiv Collegium»;
Trus I. M., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute;
Tsybulia S.D., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Cheliabiieva V.M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University.
Construction and geodesy
Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;
Mykhailovskyi D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;
Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;
Sakhno E.Yu., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National University;
Tereshchuk O.I., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University
Shults R.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Interdisciplinary Research Center for Aviation and Space Research, Head of Remote Sensing and Analysis Laboratory, Saudi Arabia;
Yurchenko V.V., Doctor of Technical Sciences, PhD in Technical Sciences,Kyiv National University of Construction and Architecture.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2025

ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

Лабур Т. М., Полкляцький А. Г., Фальченко Ю. В., Петрушинець Л. В. Статична тріщиностійкість зварних з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М, отриманих неплавким електродом і тертям із перемішуванням 9

Саліхов М. М. Використання штучного інтелекту в машинобудуванні для прискорення технологічних інновацій. 18

Книш О. Б., Білозор Ю. Ю. Параметричні дослідження кінематики обробки книжкових блоків циліндричною фрезою з пасивним приводом у машинах незшивного скріплення. 30

Sukop M., Jurko R. Implementing computer vision for a mobile robot. 40

Tuleja P. Workplace for measuring compressed air consumption in laboratory conditions. 46

Кандяк Н. М., Остафійчук Ю. І. Покращення кінематичних характеристик привода штанцювального преса із комбінованим кривошипно-повзунним механізмом. 54

Marcinko P. Design of an educational stand with ABB IRB 120 for online and offline programming 63

Бехало С. М. Збільшення ресурсу борошномельних вальців за рахунок зменшення глибини обробки поверхні. 70

Романенко М. В., Кагляк О. Д., Романенко В. В. Дослідження процесу газолазерної різки маловуглецевих сталей потужним лазером 79

Хоменко К. Ф., Кучер В. О., Осипчук О. М., Дзюман Б. В., Охріменко О. А. Формоутворення профілю зубчастих коліс червячними фрезами без протуберанця з припуском під шліфування. 91

Malik M., Jánoš R. Robot operating system, migration, gazebo, ROS1, ROS.2 101

Takac K., Semjo Ja., Pilat P. Comparison of virtual commissioning systems: EKS vs ISG virtuos. 109

Yevdokymov O., Kolesnyk V. Development of a methodology for automated selection of cutting tools for a web application. 115

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Гречанінов В. Ф. Інтелектуальна система сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури. 131

Казимир В. В., Роговенко А. І., Ткаченко К. О. Метод розпізнавання акустичних сигналів за даними спектрального аналізу за допомогою нейронних мереж. 146

Гребенник А. Г., Трунов О. І. Алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту. 158

Бялий М. О., Савков П. А. Образно-знакова модель карти, як "інформаційного каналу". 169

Волощук С. І., Савінов В. Ю. Дослідження симуляції з використанням гібридного алгоритму оптимізації рою частинок та мурашиного алгоритму у MATLAB. 176

Гончаров Д. С. Діагностика раку грудей: IOT-система з FPGA та WEKA-аналітикою 185

Лахно М. В. Метод багаторівневого аналізу цифрових слідів в інформаційно-освітніх системах 193

Милосердов Д. А., Колесницький О. К. Метод попередньої обробки сигналу ЕКГ для класифікації електрокардіограм за допомогою спайкінгових нейронних мереж 203

Ні О. В., Піскарьов О. М., Ні Я. С. Кореляційний аналіз у оптимізації архітектури користувацьких інтерфейсів програмних систем. 211

Олексієнко П. Д., Казимир В. В. Подієво-орієнтований підхід в реалізації вбудованих систем керування роєм БПЛА. 225

Підлісний Ю. І. Нечітка логіка в оцінюванні ризиків безпеки IoT: побудова правил і реалізація 237

Усік А. М., Казимир В. В. Моделювання мережевого нейтралітету в екосистемі IOT. 254

Хижняк А. В., Казимир В. В. Доменно-орієнтована мова опису персоналізованих практичних завдань для інженерних спеціальностей. 261

Хомчак М. В. Модель вибору хмарних сервісів на основі нечіткої логіки та багатокритеріальної оптимізації. 272

Чимшир В. І. Інтелектуальний двигун і моделі та методи платформи комплексної підтримки процесів життєвого циклу інфокомунікаційних сервісів. 284

Aartvork P. S., Trunova O. V. Designing a software platform for operational monitoring of water resources based on the internet of things. 296

Кучковська О. В., Лисецька О. Ю., Фундак Л. І. Оцінка ефективності відокремлених велодоріжок: комбінований підхід часових рядів та причинно-наслідкового аналізу на прикладі Бруклінського моста. 310

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Галиш В. В., Трус І. М., Ященко О. В., Громнадська М. О., Зубик П. Р. Дослідження ефективності лужної обробки пшеничної соломи для виробництва біоетанолу 322

Макєєва І. С., Кислова О. В. Вплив електрохімічно синтезованої суміші Cu/Cu2O/CuO на деструкцію поліетиленової плівки.....331

Косів Р. В., Дзіняк Б. О. Плоди дикорослих рослин – перспективна сировина для виробництва функціональних харчових продуктів.....339

Павлюк С. К., Харитоненко Г. І., Суха І. В. Аналіз сучасних підходів до забезпечення якості, безпечності та екологізації виробництва вторинного ПЕТ.....345

Хежун Ю. А., Косогіна І. В., Косогін О. В. Моніторинг якості джерел питної води в Україні. 353

РОЗДІЛ ІV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Кунденко М. П., Руденко А. Ю., Мардзявко В. А. Використання контрольованого термічного ІЧ-випромінення для боротьби з паразитами медоносних бджіл. 364

Халіков В. А., Жерносєков А. М., Шатан О. Ф. Вплив внутрішнього опору на функціонування трансформаторно-ключового регулятора напруги. 372

Яськів В. І., Домнін І. Ф., Яськів А. В. Напівпровідникові перетворювачі електроенергії з високочастотними магнітними підсилювачами для інформаційних технологій.....379

Соловйов В.Г., Романова І. Ю. Причини дестабілізації процесу електрошлакового наплавлення у стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі. 390

Voytenko V., Pisarevskiy A. Remote design of safety controllers for industrial automation systems. 401

Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Дослідження спектрального складу led-фітоламп для підвищення продуктивності овочевих культур у закритому ґрунті. 410

Tarasiuk V., Gorodny O. Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads.....419

Shevchenko-Hryshko M., Parkhomets V., Revko A., Horodniy O. Research on methods of modification of winding machine for toroid transformers 432

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Петраковська О. С., Михальова М. Ю. Трансформація освіти в галузі геодезії та землеустрою.....442

Петраковська О. С., Дубницька М. В. Обґрунтування необхідності формалізації поняття «стале землекористування». 452

Meteshkin K. O., Kukhar M. A., Shevchenko V. O., Masliy L. O. Experimental validation of the creation of conditional noospheric intelligence using geoinformation modeling 462

Васильєв О. С., Кулай В. П. Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. 472

Зезюков Д. М., Махінько М. М., Нечепуренко Д. С. Проблеми оцінки категорій пошкодження крупнопанельних частково зруйнованих будинків після динамічних і вибухових впливів 480

Ярема Н. П., Нікулішин В. І., Деміхова С. В., Согор А. Р. Створення серії вебкарт, присвячених пам'яті героя України, відомого оперного співака Василя Сліпака..... 487

Bolotov M., Prybytko I. Thermal efficiency assesment of eco-oriented prefabricated modular buildings: case study. 494

Ворох В. В., Глоба О. В. Методи та технології цифрового моніторингу в землеробстві. ..506

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....525

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

Labur T., Pokliatskyi A., Falchenko Iu., Petrushynets L. Static crack resistance of welded joints of MA2-1m magnesium alloy, obtained by a non-consumable electrode and friction stir welding.....9

Salikhov M. Use of artificial intelligence in mechanical engineering to accelerate technological innovations 18

Knysh O., Bilozor Yu. Parametric research of the kinematics of spine processing of book blocks by a cylindrical milling cutter with a passive drive in perfect binding machines 30

Sukop M., Jurko R. Implementing computer vision for a mobile robot.....40

Tuleja P. Workplace for measuring compressed air consumption in laboratory conditions.....46

Kandiak N., Ostafiychuk Yu. Improvement of kinematic characteristics of the die-cutting press drive with a combined crank-slider mechanism 54

Marcinko P. Design of an educational stand with ABB IRB 120 for online and offline programming 63

Bekhalo S. Increasing the resource of the flour milling rollers due to reducing the depth of surface processing 70

Romanenko M., Kaglyak O., Romanenko V. Study of the process of gas laser cutting of low-carbon steels with a high-power laser.....79

Khomenko K., Kucher V., Osypchuk O., Dzyuman B., Okhrimenko O. Gear tooth profile forming with a grinding allowance using hobs without protuberance 91

Malik M., Jánoš R. Robot operating system, migration, gazebo, ROS1, ROS.2 101

Takac K., Semjo Ja., Pilat P. Comparison of virtual commissioning systems: EKS vs ISG virtuos.....109

Yevdokymov O., Kolesnyk V. Development of a methodology for automated selection of cutting tools for a web application.....115

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

Grechaninov V. Intelligent system for scenario modeling of security assessment of critical infrastructure objects 131

Kazymyr V., Rohovenko A., Tkachenko K. Method of acoustic signal recognition based on spectral analysis using neural networks 146

Hrebennyk A., Trunov O. The algorithm for determining the aggregated dynamic assessment of the security state of network content.....158

Bialyi M., Savkov P. Figurative-sign model of the map as an “information channel” 169

Voloshchuk S., Savinov V. A simulation study of hybrid particle swarm optimization and ant colony algorithm in MATLAB 176

Honcharov D. Breast cancer diagnostics: IOT system with FPGA and WEKA analytics.....185

Lakhno M. A method of multilevel analysis of digital traces in information and educational systems 193

Myloserdov D. A., Kolesnytskyi O. K. ECG signal pre-processing method for electrocardiogram classification using spiking neural networks.....203

Ni O., Piskarev O., Ni Ya. Correlation analysis in optimization of the architecture of user interfaces of software systems.....211

Oleksiienko P., Kazymyr V. Event-oriented approach in the implementation of embedded UAV swarm control systems 225

Pidlisnyi Yu. Fuzzy Logic in IoT Security Risk Assessment: Rule Construction and Implementation.....237

Usik A., Kazymyr V. Simulation of network neutrality in the IOT ecosystem.....254

Khyzhniak A., Kazymyr V. A domain-specific language for describing personalized practical tasks in engineering education 261

Khomchak M. Model of cloud service selection based on fuzzy logic and multi-criteria optimization 272

Chymshyr V. Intelligent engine and models and methods of the platform for comprehensive support of the life cycle processes of information and communication services 284

Aartvork P. S., Trunova O. V. Designing a software platform for operational monitoring of water resources based on the internet of things. 296

Kuchkovska O., Lystska O., Fundak L. Evaluation of the effectiveness of separated bike lanes: a combined time series and the causal analysis approach on the example of the Brooklyn bridge 310

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Halysh V., Trus I., Yashchenko O., Hromnadska M., Zubik P. Research on the efficiency of alkaline treatment of wheat straw for bioethanol production.....322

Makyeyeva I., Kyslova O. Influence of electrochemically synthesized mixture $Cu/Cu_2O/CuO$ on the destruction of polyethylene film.....331

Kosiv R., Dzinyak B. Wild plant fruits – a promising raw material for the production of functional foods..... 339

Pavliuk S., Kharytonenko H., Sukha I. Analysis of modern approaches to ensuring quality, safety, and eco-friendliness in secondary pet production.....345

Khezhun Yu., Kosogina I., Kosohin O. Monitoring the quality of drinking water sources in Ukraine.....353

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Kundenko M., Rudenko A., Mardziavko V. Using controlled thermal IR radiation to combat honey bee parasites.....364

Khalikov V., Zhernosekov A., Shatan A. Voltage regulation of the transformer-switched device.... 372

Yaskiv V., Domnin I., Yaskiv A. Semiconductor power converters with high-frequency magnetic amplifiers for information technologies 379

Solovyov V., Romanova I. Reasons of destabilization of the electroslag melting process in the stationary current-based crystalliser.....390

Voytenko V., Pisarevskiy A. Remote design of safety controllers for industrial automation systems. 401

Mardzyavko V., Rudenko A. Research of the spectral composition of led phytolamps to increase the productivity of vegetable crops in closed ground.....410

Tarasiuk V., Gorodny O. Adaptive control to enhance energy efficiency in quasi-resonant switched-mode converters under dynamic loads.....419

Shevchenko-Hryshko M., Parkhomets V., Revko A., Horodniy O. Research on methods of modification of winding machine for toroid transformers 432

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Petrakovska O., Mykhalova M. Transformation of education in the field of geodesy and land management 442

Petrakovska O., Dubnytska M. Substantiation of the necessity to formalize the concept of “sustainable land use” 452

Meteshkin K. O., Kukhar M. A., Shevchenko V. O., Masliy L. O. Experimental validation of the creation of conditional noospheric intelligence using geoinformation modeling 462

Vasyliev O., Kulai V. Analysis of the power required to drive the blades of a plant for preparing explosive concrete 472

Zeziukov D., Mahinko M., Nechepurenko D. Problems of assessing damage categories of large-panel partially collapsed buildings after dynamic and explosive impacts.....480

Yarema N., Nikulishyn V., Demikhova S., Sohor A. Creation of a series of webmaps dedicated to the memory of the hero of Ukraine, the famous opera singer Wassyl Slipak 487

Bolotov M., Prybytko I. Thermal efficiency assesment of eco-oriented prefabricated modular buildings: case study. 494

Vorokh V., Hloba O. Methods and technologies of digital monitoring in agriculture 506

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES 525

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-9-17
УДК 621.791.14

Тетяна Михайлівна Лабур[1], Анатолій Григорович Полкляцький[2], Юрій В'ячеславович Фальченко[3], Лідія Вячеславівна Петрушинець[4]

[1]доктор технічних наук, головний науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: labur@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4064-2644
Scopus Author ID: 6506343754

[2]кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2145-973X
Scopus Author ID: 7801331498

[3]доктор технічних наук, завідувач відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-3028-2964
ResearcherID: W-2793-2017. **Scopus Author ID:** 7801687476

[4]кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)
E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7946-3056
ResearcherID: G-2891-2016. **Scopus Author ID:** 55521777800

СТАТИЧНА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МАГНІЄВОГО СПЛАВУ МА2-1М, ОТРИМАНИХ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ І ТЕРТЯМ ІЗ ПЕРЕМІШУВАННЯМ

Визначено стійкість до руйнування при позацентровому розтягу зварних з'єднань зі сплаву МА2-1М товщиною 2 мм, отриманих TIG і FSW. Показана висока чутливість сплаву до концентраторів напружень незалежно від технології зварювання. Міцність зварних з'єднань (TIG – 167…223 МПа, FSW – 178…201 МПа) близька до значень основного металу (176…230 МПа). Збільшення швидкості зварювання FSW з 8 до 24 м/год підвищує показники ПРЗТ і ПРПТ на 30–40 %. Зародження тріщини у швах з технологічним посиленням, зварених TIG на швидкості 20 м/год., відбувається при 41,1 Дж/см², в зоні сплавлення – 31,3 Дж/см². У швах без посилення тріщина поширюється при 10,3…11,8 Дж/см², у зоні сплавлення – 21,7…23,3 Дж/см². Процес FSW забезпечує кращу стійкість швів до поширення тріщин (10,2…19,9 Дж/см²).

***Ключові слова**: магнієвий сплав МА2-1М; аргонодугове зварювання неплавким електродом (TIG); зварювання тертям з перемішуванням (FSW); структурні зони зварних з'єднань; стійкість до руйнування; зародження тріщини; поширення тріщини.*
Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 17.

Постановка проблеми. Магнієві сплави відносять до легких конструкційних матеріалів, які характеризуються середньою міцністю в діапазоні 228…290 МПа та значною термічною стійкістю (до 450 °С) [1]. Мала щільність сплавів 1,74–2,0 г/см³ [2] (у 4 рази нижча за сталь) сприяє їх застосуванню у виробах, де головним показником є маса, що дозволяє зменшити силу інерції при високих швидкостях їх переміщення [3–5]. Саме такі агрегати використовуються в аерокосмічній та автомобільній техніці, рухомих частинах текстильних і друкарських машин тощо.

Коло використання магнієвих сплавів у зварних конструкціях, спорудах і технологічному обладнанні пов'язано з вимогами надійного забезпечення експлуатації виробів, оскільки під впливом навколишнього середовища та режимів навантаження однотипні конструкції можуть руйнуватися в однакових умовах за різними механізмами [4]. Тому

© Т. М. Лабур, А. Г. Полкляцький, Ю. В. Фальченко, Л. В. Петрушинець, 2025

отримання нових свідчень про характеристики тріщиностійкості сплавів та їх нероз'ємних з'єднань, зварених за різними технологіями посідає важливе місце у вирішенні зазначеної проблеми. Це зумовлено насамперед особливостями механізмів формування швів. При зварюванні плавленням відбувається розплавлення крайок з'єднуваних деталей та присадного дроту з наступною їх спільною кристалізацією під час охолодження. На зазначені процеси впливають складні умови взаємодії поміж хімічними елементами. Крім того, порівняно з основним матеріалом утворюється кристалічна структура більших розмірів, що знижує механічні властивості швів [6; 7]. Діаграми стану магнієвих сплавів свідчать [8; 9], що легуючі елементи та шкідливі домішки при плавленні розчинюються в рідкому магнії, але не утворюють ділянок змішаних структурних зон. На це впливає хімічний склад і технологічні особливості процесу зварювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Змінити характер формування швів та зберегти властивості матеріалу у зварних вузлах дозволяє використання процесу тертя робочого інструменту з перемішування металу навколо своєї осі [10-12]. Результатом цього є формування дрібнодисперсної структури швів за температурних умов, які не перевищують 70 % від значення температури плавлення металу, що забезпечує менший ступінь зниження міцності в з'єднаннях, незначний рівень залишкових напружень, а також поздовжніх і кутових деформацій у зварних вузлах. На формування якісних швів впливають основні параметри самого процесу і конструктивні особливості робочого інструменту, а також теплофізичні характеристики сплавів, що зварюються [8; 9]. Оскільки на різних ділянках зварного з'єднання вони неоднакові, це викликає утворення структурної та фазової неоднорідності в з'єднаннях. До основного металу безпосередньо примикає зона термічного впливу, у якій метал залишається недеформованим, його структура змінюється під впливом нагрівання. Ближче до центру знаходиться зона термомеханічного впливу, де під час зварювання, крім нагрівання, відбувається активна пластична деформація металу. У центральній частині з'єднання формується ядро шва, у якому спостерігається динамічна рекристалізація. Ступінь структурної та хімічної неоднорідності з'єднань залежить від терміну перебування металу у відповідних температурних інтервалах [5; 6].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оскільки магнієві сплави характеризуються підвищеною чутливістю до концентраторів напружень, що визначає працездатність виробу при експлуатації, тому важливо враховувати їхню стійкість при зародженні та поширенні тріщин в умовах, наближених до експлуатаційних, базуючись на експериментальній механіці руйнування [9].

Мета дослідження. Мета роботи – оцінити стійкість до зародження та поширення тріщин у різних структурних зонах зварних з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М, отриманих технологіями зварювання неплавким електродом (TIG) і тертям з перемішуванням (FSW).

Виклад основного матеріалу. У дослідженнях були використані листи серійного конструкційного магнієвого сплаву МА2-1М товщиною 2 мм системи легування Mg-Al-Zn-Mn, який, крім магнію, містить 4,5 % Al, 0,95 % Zn, 0,47 % Mn, 03 % Fe, 0,06 % Si, 0,01 % Cu. У сплавах цієї системи відмічають наявність рівновісної структури та дрібнокристалічний злам, які свідчать про достатньо високий запас пластичності металу, що робить його менш чутливим до зростання швидкості деформування під час виготовлення напівфабрикатів [1]. Крім того, в інтервалі оптимальних температур експлуатації цей сплав характеризується високою технологічною пластичністю, що важливо для здійснення процесу обертання робочого інструменту при зварюванні FSW. Однак з різким зростанням швидкості деформування сплаву може спостерігатися зниження його пластичності [13].

Враховуючи зазначене, процес механізованого аргонодугового зварювання TIG здійснювали за допомогою установки АСТВ-2М від джерела живлення MW-450 ("Fronius", Австрія). Для створення сприятливих умов та інтенсивного перемішування розплавленого металу зварювальної ванни, також зменшення вірогідності утворення пор у швах використовували струм прямокутної форми електричної хвилі частотою 200 Гц. Діаметр

неплавкого електрода становив 3,2 мм, а довжина його вильоту – 4 мм. Швидкість переміщення пальника становила 20 м/год. Це забезпечувало можливість коригування орієнтації електрода відносно осі стику чи довжини дуги у разі потреби, що зменшує тепловий вплив на зварюваний метал. Для отримання хімічного складу металу шва, близького до основного матеріалу, якості присадного матеріалу для формування підсилення шва використовували стрічку з основного матеріалу товщиною 2 мм. Її фіксували між зварюваними кромками, розмістивши між крайками канавки глибиною 1 мм і шириною 4 мм. Висота цієї стрічки становила 6…7 мм, що забезпечувало формування необхідного технологічного підсилення шва. За таких умов зварювання плавленням можливе виникнення характерних технологічних дефектів у вигляді пор і макровключень оксидних плівок, які утворюються здебільшого в кореневій частині шва, потрапляючи у проплав, які в конструкціях відповідального призначення усувається шляхом зачищення механічним способом до рівня основного матеріалу [9]. Тому в процесі виконання зазначеного технологічного експерименту безпосередньо перед зварюванням проводили механічне зачищення зварюваних крайок (з трьох сторін) і стрічки присадного матеріалу (з чотирьох сторін) на глибину 0,10…0,12 мм. Надійний захист розплавленого металу від окислення в зоні зварювання забезпечував аргон вищого сорту. Внутрішній діаметр захисного керамічного сопла при цьому становив 16 мм, а витрати газу досягали 20…22 л/хв. Формування якісних швів досягали при зварюванні на струмі 145…150 А. Зменшення величини струму викликало неповне сплавлення закладеної у стик стрічки присадного матеріалу з основним, а його збільшення – до порушення зовнішнього вигляду та зростання геометричних розмірів поперечного перерізу швів.

Процес зварювання тертям з перемішуванням листів досліджуваного сплаву здійснювали на лабораторній установці, розробленій в ІЕЗ ім. Є. О. Патона. Вона забезпечує постійну частоту обертання робочого інструмента 1420 об/хв. Стикові з’єднання отримували при швидкостях зварювання 8, 16 і 24 м/год, за яких відтворюються умови рівномірного притискання інструмента до поверхонь зварюваних крайок за допомогою супорта, що дозволило зменшити ймовірність утворення внутрішніх дефектів у швах у вигляді порожнин, притаманних даному процесу з’єднання [13]. При зварюванні використовували спеціальний робочий інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником довжиною 1,85 мм у вигляді зрізаного конуса з діаметром 3,4 мм при основі бурта [14].

Експериментально-випробувальні роботи здійснювали з використанням універсальної машини типу УРУ-5. Визначення границі міцності та енергетичних параметрів з’єднань відбувалось в умовах статичного позацентрового розтягування. Діаграми «напруження – деформації» реєструвались осцилографом ОСПП-300М-1. Схема випробовування відтворювала напружений стан зварних вузлів конструкцій та відповідала технічним вимогам ASMT E 561-98 [15]. Для дослідження залучали зразки Кана з гострим надрізом (R = 0,1 мм) довжиною 11 мм (рис. 1). Зародження тріщини відбувається при відносно низькому енергетичному рівні в умовах одночасного їх розтягування та згинання. Надрізи в зразках, отриманих плавленням, наносили вздовж центру шва та в зоні його сплавлення з основним металом, де утворюється структурна неоднорідність з’єднань [9]. Орієнтація надрізу в зразках, отриманих тертям з перемішуванням, була як по центру шва, так і в зоні термомеханічного впливу на відстані 2,5…3,0 мм зі сторони відходу робочого інструмента, де відбувалося руйнування зразків. Зразки основного металу мали надріз, розташований паралельно напрямку прокату напівфабрикатів. Поверхня розриву при цьому також була паралельною подовжній орієнтації напівфабрикату, що характеризується найменшими значеннями властивостей [6].

Вихідні параметри тріщиностійкості визначали за результатами обробки експериментальних кривих «навантаження-деформація». Визначали питому роботу зародження тріщини (ПРЗТ) та питому роботу поширення тріщини (ПРПТ). Такий методологічний

підхід був застосований, оскільки зазначені параметри в комплексі найбільш повно характеризують особливості стану структури за різних статичних умов навантаження при експлуатації зварних конструкцій, що дозволяє спрогнозувати поведінку реального матеріалу з тріщиною або технологічним дефектом у порівнянні з основним металом. А використання при випробуванні зразків однакових розмірів і конфігурації гострого надрізу дозволяє наближатися до ймовірних умов руйнування, які можуть відбуватися при експлуатації зварної конструкції. В табл. 1 і 2 наведено механічні властивості листів магнієвого сплаву МА2-1М та його зварних з'єднань.

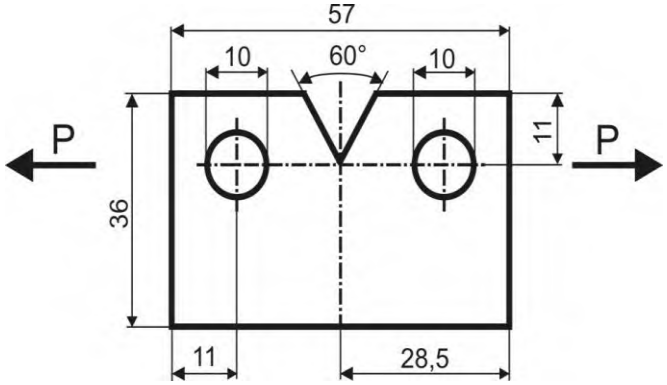


Рис. 1. Схематичне зображення зразка Кана для оцінки стійкості основного матеріалу та його зварних з'єднань до зародження та поширення експлуатаційних тріщин [16]

Таблиця 1 – Характеристики опору руйнуванню основного металу магнієвого сплаву марки МА2-1М та званих з'єднань, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом на швидкості 20 м/год

Технологічні особливості зразків	Розташування гострого надрізу	$\sigma_р$, МПа	ПРЗТ, Дж/см^2	ПРПТ, Дж/см^2
Основний метал				
вздовж прокату	по центру	176	32,5	6,7
поперек прокату	по центру	230	76,4	14,6
Зварні з'єднання				
Шви з посиленням	по центру шва	223	41,1	10,3
	по зоні сплавлення	192	31,3	21,7
Шви без посилення	по центру шва	167	26,9	11,8
	по зоні сплавлення	175	15,2	23

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Вплив швидкості зварювання тертям з перемішуванням на показники опору руйнуванню з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М, отриманих тертям із перемішуванням

Швидкість зварювання, м/год	Розташування надрізу	$\sigma_р$, МПа	ПРЗТ, Дж/см^2	ПРПТ, Дж/см^2
8	по шву	178…200 189	31,8…40,0 35,9	9,2…11,1 10,2
	по ЗТМВ	115…177 146	35,3…37,5 36,4	6,7…13,3 10,0
16	по шву	190…207 198,5	33,2…50,5 41,9	16,2…23,3 19,9
	по ЗТМВ	211…217 214	18,1…35,4 26,8	10,1…13,1 11,6
24	по шву	189…201 195	37,8…57,0 47,4	4,7…12,5 8,6
	по ЗТМВ	205…253 229	27,3…61,4 44,4	19,8…20,0 19,9

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз отриманих характеристик опору руйнування основного металу сплаву МА2-1М показує, що $\sigma_р$ змінюється від 176 до 230 МПа, ПРЗТ становить 32,5…76,4 Дж/см^2, а ПРПТ – 6,7 Дж/см^2 та 14,6 Дж/см^2. Отримані дані свідчать про наявність структурної неоднорідності досліджуваного сплаву. Зародження тріщин відбувається порівняно повільно, що може вказувати на реалізацію квазів'язкого механізму утворення мікропустот під дією пластичної деформації. Подальше швидке поширення тріщин свідчить про реалізацію квазікрихкого механізму [17].

Теплофізичні умови зварювання методом TIG викликають появу біля шва додаткових зон із різним структурно-фазовим станом внаслідок дії нерівновісного затвердіння металу під час охолодження, а також появу неоднорідних термічних і деформаційних полів, які визначають властивості з'єднань та механізм їх руйнування. Крихкого розтріскування сплаву при цьому не спостерігається. У всіх зразках із надрізом по центру шва тріщина виникає з вершини концентратора та поширюється вздовж зони його сплавлення з основним металом. У з'єднаннях, які мають технологічне посилення, номінальне напруження складає 223 МПа (табл. 1). Значення ПРЗТ при цьому становить 41,1 Дж/см^2, а ПРПТ – 10,3 Дж/см^2. У зоні сплавлення дані характеристики дорівнюють, відповідно: 192 МПа, 31,3 та 21,7 Дж/см^2, що майже збігається з аналогічними показниками основного металу.

У зразках з'єднань, де технологічне посилення швів було механічно усунуто, відмічається зниження рівня $\sigma_р$ номінального напруження (табл. 1). Значення усіх цих показників зменшуються майже удвічі порівняно зі зразками з'єднань з технологічним посиленням, що пов'язано зі зменшенням площини перетину. Показник ПРПТ близький до значень, які мають зразки з посиленням. Його величина становить 11,8 Дж/см^2, а по зоні сплавлення – 23 Дж/см^2, що вдвічі вище, ніж в основному металі досліджуваного сплаву. Зазначене може свідчити про підвищення пластичності структури в даній зоні з'єднання внаслідок структурно-фазових перетворень за умови зварювання TIG.

При застосуванні технології зварювання FSW має місце зміна досліджуваних характеристик опору руйнування з'єднань в умовах позацентрового розтягу (табл. 2). Рівень $\sigma_р$ з надрізом, розташованим у шві, коли швидкості зварювання становила 8 м/год, збільшується на 10…15 % порівняно з основним металом та становить 178…200 МПа, що близько до значень показника з'єднань, отриманих неплавким електродом. У зоні термомеханічного впливу значення номінальної міцності з'єднань менше на 25…30 % та складає 115…177 Дж/см^2. Зазначений факт вказує на суттєвий вплив структурно-фазового стану з'єднань магнієвого сплаву, отриманому FSW, оскільки метал, який нагрівається в процесі обертання робочого інструмента навколо своєї осі, перемішується та додатково викликає збільшення температури зварювального металу. Структура швів при цьому складається з окремих фрагментів твердого розчину, що мають витягнуту форму, спрямовану вздовж напрямку обертання інструмента, та фазові частки біля нього [8]. Аналогічна закономірність спостерігається також зі значеннями енергетичних показників руйнування – ПРЗТ та ПРПТ. Тріщина виникає біля вершини надрізу та поширюється в сторону основного металу, де розташовується ЗТМВ. Рівень показників не залежить від схеми нанесення гострого надрізу у шві або ЗТМВ і становить у середньому після зварювання FSW 35,9 та 36,4 Дж/см^2 відповідно. Поширення тріщини відбувається, коли ПРПТ становить 10,2 і 10,0 Дж/см^2.

Подальше підвищення швидкості обертання робочого інструмента до 16 м/год викликає підвищення значень досліджуваних показників: $\sigma_р$, ПРЗТ та ПРРТ (табл. 2), але ступінь зростання відмінний. Так, у зразках з надрізом у шві $\sigma_р$ зростає лише на 8…10 %,

а в ЗТМВ – 15…20 %. При цьому величина показника ПРЗТ швів зростає на 10 % (33,2…50,5 Дж/см^2), а в ЗТМВ знижується до 18,1…35,4 Дж/см^2, що може бути проявом значної чутливості структури сплаву. Процес зародження тріщини відбувається, відповідно, при 41,9 та 26,8 Дж/см^2, а поширення – 19,9 і 11,6 Дж/см^2.

Зварювання з тертям з перемішуванням зі швидкістю 24 м/год викликає зростання у швах показника міцності $\sigma_р$ від 189 до 201 МПа, а в ЗТМВ – від 205 до 253 МПа, що може свідчити про більший ступінь деформації сплаву та, як результат, його зміцнення. При цьому зародження тріщини відбувається при значеннях показника ПРЗТ 37,8…57 Дж/см^2, що до 1,5 раза вище, ніж при зварюванні зі швидкістю 8 м/год. У ЗТМВ цей показник дорівнює 27,3…61,4 Дж/см^2. Водночас показник поширення тріщини (ПРПТ) швів знижується в середньому на 10% (8,6 Дж/см^2), а в ЗТМВ зростає до 19,9 Дж/см^2.

Аналіз отриманих результатів дослідження стійкості руйнування магнієвого сплаву МА2-1М показує, що зміни напруженого стану, які виникають внаслідок дифузії та структурно-фазового перетворення металу під час зварювання, доцільно враховувати, залучаючи параметри експериментальної механіки руйнування. Зазначене може бути зумовлено проявами механізму розпаду твердого розчину при нагріванні та коагуляції зміцнювальної інтерметалідної фази в структурі магнієвого сплаву при охолодженні [8–10]. Підтверджено, що застосування технології FSW, на відміну від зварювання неплавким електродом, забезпечує зростання номінальної міцності та енергетичних показників – ПРЗТ та ПРПТ. Це може бути викликано дією пластичної деформації металу під час виконання процесу тертя робочого інструменту та подальшого перемішування навколо осі. Характеристики опору руйнуванню швів суттєво перевищують аналогічні значення показників основного металу, а для ЗТМВ збігаються. Процес відбувається переважно шляхом в'язкого мікромеханізму руйнування.

Висновки. Уперше визначена стійкість зварних з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М товщиною 2 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом і тертям з перемішуванням, до експлуатаційного руйнування. Встановлено, що чутливість його зварних з'єднань до гострого надрізу не залежить від способу зварювання. Підтверджена доцільність залучання експериментальної механіки руйнування для поглибленого вивчення стану окремих локальних ділянок зварних з'єднань, утворених під час зварювання структурно-фазовими перетвореннями.

Показано, що в умовах дії одночасного розтягування та згину міцність сплаву МА2-1М становить 176…230 МПа. Міцність швів, зварених неплавким електродом, визначається наявністю технологічного посилення і становить 167…223 МПа, а в зоні сплавлення дещо менше (175…192 МПа). При зварюванні тертям з перемішуванням рівень міцності швів визначається швидкістю обертання робочого інструменту (8…24 м/год) навколо своєї осі та коливається від 178 до 207 МПа, а в ЗТМВ – 115…253 МПа.

Встановлено, що технологічний процес FSW незалежно від швидкості зварювання магнієвого сплаву МА2-1М забезпечує більшу стійкість з'єднань, як при зародженні (35,9…47,4 Дж/см^2), так і поширенні тріщин (8,6…19,9 Дж/см^2). Аналогічна закономірність спостерігається і в ЗТМВ, але рівень показників на 30…40 % нижчий та наближається до значень основного металу. Значення показників ПРЗТ і ПРПТ з'єднань, отриманих зварюванням неплавким електродом, залежать від наявності технологічного посилення швів. У разі його присутності значення ПРЗТ становить 41,1 Дж/см^2, а в зоні сплавлення – 31,3 Дж/см^2. Механічне усунення посилення викликає зниження вдвічі да-

них показників. Аналогічна залежність також спостерігається і на етапі поширення тріщини (ПРПТ). З'єднання з посиленням мають, відповідно, значення 10,3 і 21,7 Дж/см^2, а при його відсутності – 11,8 і 23,3 Дж/см^2. Основний метал сплаву МА2-1М характеризується вздовж прокату значеннями ПРЗТ = 32,5 Дж/см^2 і ПРПТ = 6,7 Дж/см^2, а поперек – 76,4 та 14,6 Дж/см^2 відповідно.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували ChatGPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автор(и) переглянув(ли) та відредагува(ли) зміст за потреби і взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Avedesian, M. M., & Baker, H. (1999). *Magnesium and magnesium alloys*. Metals Handbook. ASM International.

2. Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Anand Chairman, C., & Balasundaram, R. (2020). Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. *Materials Today: Proceedings*, *27*, 909–913. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255.

3. Zuemer, N. (1998). Magnesium alloys in new aeronautic equipment. In *Proceedings of the Conference on Magnesium Alloys and Their Applications* (pp. 125–132). Wolfsburg, Germany.

4. Luo, A. A. (2002). Magnesium: Current and potential automotive applications. *JOM*, *54*(2), 42-48. https://doi.org/10.1007/BF02701073.

5. Shapiro, A. E. (2005). Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites. *Welding Journal, 84(10)*, 33–43.

6. Іщенко, А. Я., & Лабур, Т. М. (2013). *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Наукова думка.

7. Hongjie, L., Jis, M., Wencai, L., Guohua, W., Jiawei, S., Xin, T., & Peijin, C. (2022). Influence of TIG welding process parameters on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy. *Journal of Materials Research and Technology, 20*, 4114–4129. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.157.

8. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., et al. (1991). *Friction stir butt welding* (International Patent Application No. PCT/GB92/02203; GB Patent Application No. 9125978.8).

9. Pietras, A., & Zadroga, L. (2003). Rozwój metody zdrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, 5*, 148–154.

10. Lee, W. B., Leon, Y. M., & Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology, 19(6)*, 785–790. https://doi.org/10.1179/026708303225001867.

11. Aritoshi, M. (2005). Friction stir welding of magnesium alloy sheets. *Journal of the Japan Welding Society, 23(3)*, 18–23.

12. Pokluatskyi, A. G., Fedorchuk, V. E., Motrunich, S. I., Falchenko, Yu. V., & Sahul, M. (2024). Strength and structure of MA2-1M magnesium alloy butt joints produced by argon arc welding with a non-consumable electrode and by friction with stirring. *The Paton Welding Journal, 2*, 14–18. https://doi.org/10.37434/tpwj2024.02.03.

13. Poklyatskii, A. G. (2019). Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding Journal, 8*, 37–42. https://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.06.

14. Іщенко, А. Я., & Покляцький, А. Г. (2010). *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів* (Патент України, № 54096).

15. ASTM International. (1998). *Standard test method for K_IC testing of metallic materials*. (ASTM E561-98).

16. Институт электросварки им. Е.О. Патона АН УССР. (1981) *Каталог образцов для испытаний металлов*. ИЭС им. Е.О. Патона.

17. Романів, О. М., Зима, Ю. В., & Карпенко, Г. В. (1974). *Електронна фрактографія зміцнених сталей*. Наукова думка.

References

1. Avedesian, M. M., & Baker, H. (1999). *Magnesium and magnesium alloys*. Metals Handbook. ASM International.

2. Jayasathyakawin, S., Ravichandran, M., Baskar, N., Anand Chairman, C., & Balasundaram, R. (2020) Mechanical properties and applications of Magnesium alloy – Review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 909–913. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.255

3. Zuemer, N. (1998). Magnesium alloys in new aeronautic equipment. In *Proceedings of the Conference on Magnesium Alloys and Their Applications* (pp. 125–132). Wolfsburg, Germany.

4. Luo, A. A. (2002). Magnesium: Current and potential automotive applications. *JOM*, 54(2), 42–48. https://doi.org/10.1007/BF02701073

5. Shapiro, A. E. (2005). Brazing magnesium alloys and magnesium matrix composites. *Welding Journal, 84(10)*, 33–43.

6. Ishchenko, A. Ya., & Labur, T. M. (2013). Svarka sovremennykh konstruktsii iz alyuminiyevykh splaviv [Welding of modern structures from aluminum alloys]. *Naukova dumka – Scientific thought.*

7. Hongjie, L., Jis, M., Wencai, L., Guohua, W., Jiawei, S., Xin, T., & Peijin, C. (2022). Influence of TIG welding process parameters on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy. *Journal of Materials Research and Technology, 20*, 4114–4129. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.157

8. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., et al. (1991). *Friction stir butt welding* (International Patent Application No. PCT/GB92/02203; GB Patent Application No. 9125978.8).

9. Pietras, A., & Zadroga, L. (2003). Rozwój metody zdrzewania tarciowego z mieszaniem materiału zgrzeiny (FSW) i możliwości jej zastosowania. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach, 5*, 148–154.

10. Lee, W. B., Leon, Y. M., & Jung, S. B. (2003). Joint properties of friction stir welded AZ31B-H24 magnesium alloy. *Materials Science and Technology, 19(6)*, 785–790. https://doi.org/10.1179/026708303225001867

11. Aritoshi, M. (2005). Friction stir welding of magnesium alloy sheets. *Journal of the Japan Welding Society, 23(3)*, 18–23.

12. Pokluatskyi, A. G., Fedorchuk, V. E., Motrunich, S. I., Falchenko, Yu. V., & Sahul, M. (2024). Strength and structure of MA2-1M magnesium alloy butt joints produced by argon arc welding with a non-consumable electrode and by friction with stirring. *The Paton Welding Journal, 2*, 14–18. https://doi.org/10.37434/tpwj2024.02.03

13. Poklyatskii, A. G. (2019). Prediction of parameters of friction stir welding of sheet aluminium alloys. *The Paton Welding Journal, 8*, 37–42. https://doi.org/10.15407/tpwj2019.08.06

14. Ishchenko, A. Ya., & Pokliatskyi, A. H. (2010). Instrument dlia zvariuvannia tertiam z peremishuvanniam aliuminiievykh splaviv [Friction stir welding tool for aluminum alloys]. (Ukrainian patent, № 54096).

15. ASTM International. (1998). *Standard test method for K_IC testing of metallic materials*. (ASTM E561-98).

16. Instytut elektrozwarki im. Ye.O. Patona AN URSR. [Paton Institute of Electric Welding of the Academyc of Sciences of the UkSSR]. (1981). *Kataloh obraztsov dlia ispytaniy metallov [Catalogue of specimens for metal testing]*. IES im. Ye. O. Patona.

17. Romaniv, O. M., Zyma, Yu. V., & Karpenko, H. V. (1974). Elektronna fraktohrafiia zmitsnenykh stalei [Electronic fractography of hardened steels]. *Naukova dumka.*

Отримано 31.07.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 621.791.14

Tetiana Labur[1], Anatolii Pokliatskyi [2], Iurii Falchenko[3], Lidiia Petrushynets[4]

[1]Doctor in Technical Sciences,
Chief Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: labur@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-4064-2644
Scopus Author ID: 6506343754

[2]PhD in Technical Sciences,
Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: pokliatskyi@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2145-973X
Scopus Author ID: 7801331498

[3]Doctor in Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: falchenko@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-3028-2964
ResearcherID: W-2793-2017. **Scopus Author ID:** 7801687476

[4]PhD in Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: petrushynets@paton.kiev.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7946-3056
ResearcherID: G-2891-2016. **Scopus Author ID:** 55521777800

STATIC CRACK RESISTANCE OF WELDED JOINTS OF MA2-1M MAGNESIUM ALLOY, OBTAINED BY A NON-CONSUMABLE ELECTRODE AND FRICTION STIR WELDING

Magnesium alloys are considered promising materials for use in aerospace and automotive engineering. However, their increased sensitivity to stress concentrators can adversely affect the material's performance during operation. Therefore, it is essential to assess their resistance to crack initiation and propagation under conditions simulating actual operation, based on the principles of experimental fracture mechanics.

This work aims to evaluate the resistance to crack initiation and propagation in different structural zones of welded joints in the MA2-1M magnesium alloy, produced using tungsten inert gas welding and friction stir welding technologies.

The resistance to failure under eccentric tensile loading of MA2-1M magnesium alloy welded joints, 2 mm in thickness and produced by argon arc welding with a non-consumable electrode (TIG) and by friction stir welding (FSW), was determined. The testing configuration replicated the stress state of welded structural joints and complied with the technical requirements of ASTM E561-98.

It has been shown that under combined tension and bending, the strength of joints welded using a non-consumable electrode is determined by the presence of technological reinforcement and ranges from 167 to 223 MPa, while in the fusion zone it ranges from 175 to 192 MPa. For friction stir welding, the strength level of the joints is determined by the rotational speed of the welding tool (8–24 m/h) and ranges from 178 to 207 MPa, with values in the heat-affected zone (HAZ) ranging from 115 to 253 MPa.

It has been established that the FSW process, regardless of the welding speed, provides greater stability of MA2-1M joints in terms of both crack initiation and propagation. The values of specific crack initiation work (SCIW) and specific crack propagation work (SCPW) for joints obtained by TIG welding are halved when the reinforcement is mechanically removed.

The resistance of welded joints of MA2-1M magnesium alloy has been determined for the first time. It has been found that the sensitivity of these welded joints to sharp notches does not depend on the welding method.

Keywords: *MA2-1M magnesium alloy; argon arc welding with a non-consumable electrode (TIG); friction stir welding (FSW); structural zones of welded joints; fracture resistance; crack initiation; crack propagation.*

Fig.: 1. Table: 2. References: 17.

Лабур Т. М., Полкляцький А. Г., Фальченко Ю. В., Петрушинець Л. В. Статична тріщиностійкість зварних з'єднань магнієвого сплаву МА2-1М, отриманих неплавким електродом і тертям із перемішуванням. *Технічні науки та технології.* 2025. № 3(41). С. 9-17. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-9-17.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-18-29
УДК 004.896:007.52

Михайло Михайлович Саліхов

аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки (Харків, Україна)
E-mail: mykhailosalikhov@gmail.com. **ORCID: https:**//orcid.org/0009-0003-7356-5344

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МАШИНОБУДУВАННІ ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ

У статті узагальнено підходи до тлумачення поняття «штучний інтелект» (ШІ) у контексті його використання в машинобудуванні. Встановлено, що ШІ виходить за межі імітації людських функцій і ґрунтується на здатності систем сприймати, аналізувати інформацію, діяти автономно й адаптуватися. На основі підходу ЄС до визначення ШІ-систем окреслено шість ключових їхніх характеристик, релевантних для машинобудування. Виявлено категорії ШІ, які мають широке застосування в машинобудуванні, а також десять сфер, де вони використовуються. Показано, що в кожній сфері застосовуються різні категорії ШІ, які забезпечують інновації продуктів і процесів. Досліджено приклади програмних рішень, що реалізують ШІ та сприяють прискоренню інновацій у машинобудуванні.

***Ключові слова**: штучний інтелект, машинобудування, інновації, машинне навчання, глибинне навчання, робототехніка, проєктування, автоматизація виробництва.*

Табл.: 4. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Сучасне машинобудування переживає період глибоких трансформацій, зумовлених як переходом до Індустрії 4.0, так і рядом глобальних викликів: збройними конфліктами, епідеміями, демографічними змінами, зокрема старінням населення, зміною клімату, а також обмеженістю природних та енергетичних ресурсів. Ці виклики формують нові завдання для галузі та спонукають до пошуку нових інструментів прискорення технологічних інновацій: створення нових та вдосконалення наявних товарів, процесів, послуг. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) розглядається як один з ключових факторів технологічних змін. Як зазначено в заяві Союзу німецьких машинобудівників (Verbum Domini Manet in Aeternum), ШІ – це шанс для європейського машинобудування зберегти глобальне лідерство, а компанії галузі – ключовий рушій впровадження цих технологій у промислове виробництво [1].

Постановка проблеми. З метою підвищення конкурентоспроможності сучасне машинобудування зосереджується не лише на впровадженні інновацій, а й на вирішенні завдань, пов’язаних із забезпеченням енергоефективності, ресурсоощадності, технологічної точності та складності, екологічної безпеки. Розв’язання цих завдань ускладнюється дефіцитом кваліфікованих кадрів, а також потребою досягати балансу між якістю, довговічністю, собівартістю, швидкістю розробки та виробництва і мінімальним впливом на довкілля. Обмеженість традиційних інженерних підходів уже не дозволяє оперативно та ефективно реагувати на динамічні технологічні зміни й зростаючі ринкові вимоги. Це створює структурну прогалину, яка актуалізує потребу в пошуку нових, гнучких рішень для забезпечення інновацій у проєктуванні, моделюванні, виробництві та інших сферах машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальна праця Стюарта Рассела та Пітера Норвіга (4-те видання, 2021 р.) [2] охоплює широкий спектр теоретичних і практичних аспектів застосування ШІ й показує, що це широка наукова, технічна і філософська концепція. Хоча автори безпосередньо не розглядають проблематику застосування цих технологій в машинобудуванні, книга надає знання з машинного навчання (ML), глибокого навчання (DL), обробки природної мови (NLP), робототехніки, етики та безпеки ШІ, які є базовими для застосування в будь-якій галузі промисловості.

У контексті цифрової трансформації, що охоплює всі сектори промисловості концепція Індустрії 4.0 набула особливої актуальності у наукових працях. Результати досліджень демонструють особливості інтеграції ШІ в реальне виробництво та бар’єри – технічні, організаційні, кадрові, а також виклики, пов’язані з прозорістю моделей і фрагментацією даних [3].

© М. М. Саліхов, 2025

Дослідження свідчить [4], що ШІ перетворюється на ключовий рушій трансформації галузі – від оптимізації виробничих ліній до автоматизації та екологізації технологічних процесів. Наголошується, що ці технології дедалі активніше впроваджується як великими корпораціями, так і малим і середнім бізнесом для модернізації, підвищення енергоефективності та гнучкості промислового виробництва.

Особливу увагу приділено ролі ШІ в інноваціях у машинобудуванні [5; 6]. Зазначено, що такі технології впливає на ключові сфери діяльності галузі, включаючи операційне управління, планування, контроль якості, прогнозування енергоспоживання, оптимізацію процесів, безпеку, проєктування продукції, автоматизацію та взаємодію людини з машиною.

Робота [7] показує, що широке використання технологій ШІ у машинобудуванні здатне докорінно змінити традиційні процеси проєктування, виробництва та обслуговування. Обґрунтовано, що завдяки інструментам проєктування на основі нових цифрових технологій інженери тепер можуть швидше та ефективніше створювати оптимізовані конструкції, що веде до підвищення продуктивності виробів і скорочення циклів розробки. Показано, що прогностичні методи, які застосовують ці технології в системах технічного обслуговування, сприяють ранньому виявленню відмов обладнання, мінімізуючи час простою та витрати на обслуговування.

Автори [8] приділили увагу інтеграції ШІ із системами автоматизованого проєктування й виробництва – CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Engineering), CIM (Computer-Integrated Manufacturing). Обґрунтовано, що це сприяє підвищенню точності інженерних рішень і скороченню життєвого циклу розробки продукції.

У багатьох дослідженнях [9; 10] проаналізовано вплив ШІ та машинного навчання (ML). Показано, що ключовими напрямами застосування цих систем у машинобудуванні є предиктивне обслуговування, оптимізація проєктування, моніторинг стану конструкцій, контроль якості, оптимізація використання ресурсів. У [11] зазначено, що метод глибокого навчання є перспективним для виявлення дефектів і розпізнавання образів у машинобудуванні; як приклад наведено досвід його застосування для технічної діагностики в автомобільному виробництві.

Загалом доведено, що ШІ сприяє інноваціям, трансформуючи традиційні інженерні підходи, впливаючи на вибір матеріалів, адаптивне проєктування та гнучке управління виробничими лініями. Водночас порушуються питання етики, стандартизації та прозорості використання таких технологічних рішень [12; 13]. Ці питання набули державної ваги: у ЄС було прийнято Закон про ШІ, положення якого, зокрема, вказують на заборонені сценарії використання технологій, що створюють неприйнятні ризики для суспільства [14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри детальне вивчення внеску ШІ у розв’язання сучасних проблем індустрії, зокрема машинобудування, небагато наукових робіт приділяють увагу особливостям практичного використання інструментів (програмних продуктів) зі штучним інтелектом та сферам їх застосування для прискорення інновацій у машинобудуванні.

Мета роботи – дослідити понятійний апарат, роль і значення штучного інтелекту як чинника інновацій у машинобудуванні, проаналізувати категорії ШІ та сфери їх застосування, а також програмні продукти які забезпечують використання цих технологій у машинобудуванні.

Виклад основного матеріалу. Аналіз наукових праць, інтернет-ресурсів, енциклопедій та офіційних документів міжнародних організацій дозволив виявити характерні ознаки ШІ, що подаються у визначеннях (табл. 1) і мають значення для дослідження його застосування в машинобудуванні.

Таблиця 1 – Визначення ШІ із характеристиками, які мають значення для дослідження застосування цих технологій в машинобудуванні

Джерело	Визначення ШІ
Russell S.J., Norvig P. [2]	Наука про агентів, які отримують інформацію з навколишнього середовища та виконують дії, реалізуючи функції, що перетворюють послідовності сприйнять у відповідні реакції, при цьому враховуючи різноманітні типи агентів ~~ШІ~~ – від реактивних і планувальників у реальному часі до систем на основі теорії прийняття рішень і глибокого навчання, де навчання виступає ключовим засобом формування компетентності й адаптації в нових умовах, а робототехніка та комп'ютерний зір слугують інструментами для досягнення цілей з урахуванням специфіки середовища задачі, що визначає оптимальний дизайн агента.
Monostori L. [15]	Наука та інженерія створення інтелектуальних машин і програм, які проявляють властивості, притаманні людському інтелекту, такі як міркування, навчання, цілеспрямованість, розв'язання проблем і адаптивність, при цьому не обов'язково імітуючи людський інтелект, оскільки рішення можуть базуватися на унікальних здібностях, недоступних людям чи тваринам, наприклад, на масштабних обчисленнях.
IBM [16]	Технологія, що дозволяє комп'ютерам і машинам імітувати людське навчання, розуміння, розв'язання проблем, прийняття рішень, креативність і автономність. Програми з використанням ШІ можуть розпізнавати об'єкти, розуміти людську мову, навчатися на новій інформації, надавати рекомендації і діяти самостійно, без втручання людини
DigitalDefynd [17]	Конвергенція обчислювальної потужності та високорозвинених алгоритмів з метою імітації й розширення людських когнітивних процесів. Ефективна ШІ-система ґрунтується на: надійних механізмах збору та попередньої обробки даних; адаптивних і масштабованих алгоритмах, здатних навчатися на різнорідних наборах даних; динамічному середовищі для навчання моделей у поєднанні з безперервною оцінкою та зворотним зв'язком; а також етичному рівні, що забезпечує прозорість і справедливість.
ЄС [14]	Система на основі машини, яка призначена для роботи з різними рівнями автономності, може виявляти адаптивність після впровадження та, діючи відповідно до явних або неявних цілей, робить висновки на основі отриманих вхідних даних щодо формування результатів, таких як прогнози, контент, рекомендації або рішення, що можуть впливати на фізичне або віртуальне середовище.

Джерело: складено автором.

Узагальнення цих формулювань дало змогу зробити висновок, що ШІ пов'язаний зі створенням інтелектуальних систем або агентів, здатних сприймати інформацію, аналізувати її та діяти. Як наука й інженерія створення машин і програм із властивостями людського інтелекту (міркування, навчання, цілеспрямованість, розв'язання проблем, адаптивність), ці технології не обмежується імітацією людських здібностей, а може ґрунтуватися на унікальних можливостях, зокрема масштабних обчисленнях. Навчання є ключовим методом формування компетентності та адаптації в нових середовищах. ШІ застосовується в різних задачах, має різні рівні автономії, здатний адаптуватися та впливати на фізичне чи віртуальне середовище.

Для цілей регулювання в ЄС на законодавчому рівні запроваджено поняття «ШІ-система» (AI system) як технічного об'єкта. З огляду на це для дослідження важливо враховувати такі ключові характеристики:

1. Машинна система. Йдеться не лише про програму, а про комплекс апаратних і/або програмних компонентів, що функціонують разом. У машинобудуванні, наприклад, інтелектуальна виробнича лінія з роботами і системами контролю якості – це поєднання сенсорів, роботизованих маніпуляторів та алгоритмів керування.

2. Різні рівні автономії. Від систем, які виконують базові завдання під контролем людини, до повністю автономних. У машинобудуванні це можуть бути частково автономні

роботи для складання деталей (з використанням, наприклад, алгоритмів графового пошуку) або повністю автономні комплекси, що самостійно налаштовують параметри зварювання чи фарбування на основі методів машинного навчання.

3. Здатність адаптуватися після впровадження. Система може навчатися, змінюючи свою поведінку в реальному часі на основі нових даних. У машинобудуванні це, зокрема, системи предикативного обслуговування, які аналізують сенсорні дані (температура, вібрація тощо), оновлюючи моделі прогнозування несправностей за допомогою методів глибокого навчання.

4. Аналіз вхідних даних. Система робить висновки на основі інформації, отриманої з сенсорів, баз даних або іншого оточення. Наприклад, аналіз показників температури, вібрації та тиску дозволяє здійснювати автоматичне коригування процесів або планувати обслуговування.

5. Генерація вихідних даних. Система створює результати у вигляді прогнозів, рішень або команд. У машинобудуванні це можуть бути, наприклад, команди роботам, прогнози часу до відмови обладнання або рекомендації щодо оптимізації виробничих параметрів – з використанням методів оптимізації, таких як генетичні алгоритми чи навчання з підкріпленням.

6. Вплив на фізичне чи віртуальне середовище. Результати роботи ШІ-систем можуть проявлятися як у фізичному (керування машинами, маніпуляторами), так і у віртуальному просторі (оновлення цифрових двійників, аналітичних панелей). У машинобудуванні це, зокрема, реалізується через технології Інтернету речей (IoT) та цифрових близнюків (digital twins).

Зважаючи на наведене, ШІ-система в машинобудуванні – це комплексна машинна система, що об’єднує апаратні та програмні компоненти, здатна виконувати завдання з різними рівнями автономії: від частково керованих процесів до повністю автономних виробничих комплексів. Така система адаптується після впровадження, навчається в реальному часі, аналізує вхідні дані зі середовища (сенсори, бази даних) і генерує вихідні сигнали, прогнози або команди, які впливають як на фізичні процеси, так і на цифрові представлення виробництва.

У цій роботі ШІ та ШІ-системи використовуються як синоніми.

Як показало дослідження, для досягнення цілей у машинобудуванні, насамперед підвищення ефективності, ШІ-системи охоплюють широкий спектр методів – від класичних систем на основі правил до складних нейронних мереж і еволюційних алгоритмів. Кожен із цих методів має власні особливості та сфери застосування в конкретних інженерних завданнях. Для систематизації цих методів і наочності їхнього практичного використання в машинобудуванні сформовано табл. 2.

Для того щоб досліджувати зв'язок ШІ з інноваціями в машинобудуванні, слід уточнити понятійний апарат. Відповідно до Керівництва Осло (яке є настановою ОЕСР щодо збору, представлення та використання даних про інновації) [18], інновація – це новий або вдосконалений продукт або процес (або їхня комбінація), який значно відрізняється від попередніх продуктів або процесів і який став доступним потенційним користувачам (продукт) або впроваджений у виробництво (процес). Також Керівництво Осло виділяє такі поняття:

- продуктова інновація – це нова або вдосконалена продукція або послуга, яка суттєво відрізняється від попередніх товарів або послуг підприємства та яка була представлена на ринку;

- інновація бізнес-процесу – це новий або вдосконалений бізнес-процес для однієї або декількох бізнес-функцій, який суттєво відрізняється від попередніх бізнес-процесів підприємства і який був впроваджений у виробництво підприємством.

Аналіз наукових праць [2–13] та інших джерел свідчить, що низка досліджень обґрунтовує вплив ШІ як на продуктові інновації, так і на інновації бізнес-процесів у машинобудуванні. Водночас важливо розрізняти категорії цих технологій, оскільки саме вони зумовлюють різні типи інновацій у ключових сферах галузі – від проєктування та виробництва до обслуговування, управління й оптимізації.

З-поміж ряду категорій ШІ, згаданих у літературі, у контексті інновацій в машинобудуванні найчастіше згадуються такі (табл. 2).

Машинне навчання (Machine Learning, ML) забезпечує прогнозування дефектів, оптимізацію технологічних параметрів та контроль якості продукції.

Глибинне навчання (Deep Learning, DL) допомагає в обробці складних зображень для виявлення дефектів на деталях, аналізі технічних даних і розпізнаванні складних шаблонів.

Правила та логіка (Rule-Based Systems) використовуються для автоматизації діагностики обладнання, підтримки прийняття рішень у проєктуванні та виробничому контролі.

Комп'ютерний зір (Computer Vision, CV) застосовується для візуального контролю якості, виявлення дефектів, а також для автоматизації виробничих ліній.

Робототехніка (Robotics) дозволяє автоматизувати збірку, навігацію та контроль рухів робітників і маніпуляторів на виробництві. Хоча робототехніка фактично є однією з ключових складових машинобудування, особливо в сучасних промислових процесах (вона забезпечує створення, програмування й експлуатацію роботизованих систем, які автоматизують виробничі операції індустрії), у контексті дослідження ШІ її виділяють як окрему категорію, де існують специфічні технології та задачі (наприклад, автономні роботи, маніпулятори, взаємодія з людьми), що підкреслює особливості «втіленого інтелекту» [14].

Прогнозна аналітика (Predictive Analytics) дає змогу передбачати відмови устаткування і планувати профілактичне обслуговування.

Пояснюваний ШІ (Explainable AI) дає пояснення рішень, прийнятих із застосуванням цих технологій. У машинобудуванні це особливо актуально, оскільки критично важливим є розуміння логіки й обґрунтованість дій ШІ у складних, високовартісних або ризикованих процесах.

Таблиця 2 – Категорії ШІ, що мають широке застосування в машинобудуванні

Категорія	Приклади застосування в машинобудуванні
1	2
Машинне навчання (Machine Learning)	Побудова моделей, які аналізують виробничі дані і оптимізують параметри процесу (наприклад, швидкість обробки, температура, витрата ресурсів) Прогнозування енергоспоживання, виявлення аномалій та зменшення втрат Навчання промислових роботів новим завданням на основі демонстрацій або симуляцій
Глибинне навчання (Deep Learning)	Аналіз зображень деталей для виявлення тріщин, подряпин, деформацій Аналіз часових рядів сенсорних даних (вібрація, шум, температура) з метою прогнозування зносу або відмов обладнання Моделювання складних фізичних процесів у режимі реального часу за допомогою нейронних мереж Прогнозування вихідних характеристик виробу на основі вхідних параметрів виробничого процесу
Правила та логіка (Rule-Based Systems)	Діагностика несправностей (наприклад, системи експертної підтримки операторів) Керування технологічними процесами (задання умов для включення / вимкнення обладнання) Проєктування конструкцій (вибір матеріалів або технічних рішень залежно від умов)

Закінчення табл. 2

1	2
Комп'ютерний зір (Computer Vision)	Перевірка правильності складання, наявності необхідних компонентів, маркувань або позиціонування деталей Допомога роботизованим системам розпізнавати об’єкти, орієнтуватися в просторі, виконувати точні маніпуляції Контроль стану верстатів чи систем подачі матеріалів
Робото-техніка (Robotics)	Автоматизації виробничих процесів (роботи виконують операції з монтажу, зварювання, фарбування, пакування та інші повторювані або небезпечні задачі) Роботизовані маніпулятори виконують точні операції з переміщення, сортування та складання деталей Колаборативні роботи (cobots), які працюють поруч із людьми, допомагають їм підвищувати продуктивність і безпеку
Прогнозна аналітика (Predictive Analytics)	Алгоритми прогнозують ймовірність відмови обладнання на основі даних сенсорів (температура, вібрація, шум), що дозволяє запланувати ремонт до настання несправності; потребу в матеріалах, деталях, інструментах – оптимізуючи запаси та мінімізуючи простої Системи аналізують виробничі параметри та прогнозують, чи буде продукція відповідати стандартам якості Моделі оцінюють ризики технологічних збоїв або затримок, підказуючи варіанти реагування
Пояснюваний ШІ (Explainable AI)	Якщо система прогнозує поломку, ШІ показує, які саме дані та закономірності вплинули на цей висновок (наприклад, вібрація, температура, шум) При виявленні дефектів системи комп’ютерного зору, пояснює, які ознаки зображення класифікували деталь як браковану

Джерело: складено автором.

Крім зазначених вище категорій, виділяють також: еволюційні алгоритми (Evolutionary Algorithms) – переважно застосовуються для складних оптимізаційних задач (проєктування, оптимізація); фуззі-логіку (Fuzzy Logic) – корисну там, де потрібно моделювати невизначеність (оптимізація, обслуговування, проєктування); нейросимволічні системи (Neuro-Symbolic AI) – які поєднують логіку та ML, перспективні для складних інженерних задач; планування і пошук (Planning and Search) – важливі для робототехніки та співпраці людина – машина; обробку сигналів і датчиків – часто інтегровану з ML, критичну для діагностики й обслуговування; інтелектуальну автоматизацію – комплексні рішення, що включають ML, робототехніку та логіку; інтерпретованість і пояснюваність ШІ (Explainable AI) – критично важливі для довіри, безпеки та регулювання, є ключовою вимогою, хоч і не окремою технологією. Цифрові двійники (Digital Twins) використовуються для моделювання, симуляції й моніторингу обладнання та процесів, що допомагає оптимізувати виробництво й знижувати ризики.

Перелік категорій ШІ, наведений у табл. 2, ілюструє різноманіття технологій, що застосовуються в сучасному машинобудуванні для вдосконалення всіх етапів виробничого циклу – від проєктування та моделювання до контролю якості й технічного обслуговування.

Джерела [5; 6; 9; 19; 20; 21] вказують на ключові напрями використання ШІ в галузі. Агрегування цих даних дало змогу визначити етапи та сфери машинобудування, у яких застосування цих технологій стало найбільш поширеним і має значний потенціал для подальших інновацій. Ці сфери подано нижче.

1. Проєктування та оптимізація конструкцій – етап створення та вдосконалення технічних виробів. У межах цієї сфери здійснюється оптимізація форми, структури, параметрів виробу; створення нових конструкцій на основі заданих обмежень і цілей; удосконалення традиційного CAD-програмного забезпечення (автоматичне моделювання, перевірка помилок тощо). ШІ забезпечує автоматизоване генерування численних варіантів

конструкцій з урахуванням заданих вимог, сприяє прискоренню створення проєктної документації та зменшенню кількості помилок і повторних ітерацій у процесі розробки.

2. Передбачувальне обслуговування (Predictive Maintenance) – етап експлуатації та обслуговування в життєвому циклі машинобудівного виробу. ШІ застосовується для збору та обробки даних з датчиків (використовуються сенсори для моніторингу параметрів обладнання). Моделі ML навчаються на історичних даних про роботу обладнання, включаючи інформацію про несправності, щоб виявляти закономірності, які передують поломкам, класифікувати типи зносу, прогнозувати ймовірний час відмови. Нові цифрові технології може автоматично виявляти приховані ознаки несправностей та генерувати прогнози щодо стану обладнання. Камери та алгоритми комп'ютерного зору можуть виявляти знос, тріщини або іржу на поверхнях машин. Моделі цифрових двійників імітують поведінку обладнання.

3. Автоматизація виробництва та верстатів – етап виробництва в життєвому циклі машинобудівного продукту. У межах цієї сфери відбувається автоматизація виробництва (використання систем, які автоматично виконують технологічні операції, зменшуючи або повністю усуваючи потребу у втручанні людини); робототехніка (розробка, програмування і використання роботів); комп’ютерне числове керування (технологія, у якій верстатами керує комп’ютерна програма замість оператора). ШІ забезпечує підвищення точності та продуктивності виробничих операцій завдяки використанню інтелектуальних роботизованих систем, що дозволяє зменшити трудові витрати та підвищити якість кінцевої продукції.

4. Контроль якості та візуальна інспекція – етап завершення виробничого циклу. ШІ автоматизує процес виявлення дефектів, зокрема за допомогою систем комп’ютерного зору, що забезпечує стабільну якість продукції та зниження витрат на повернення і переробку. Машинне та глибинне навчання забезпечують класифікацію продукції на придатну / непридатну.

5. Оптимізація виробничих процесів – етап операційного управління виробництвом, що передбачає постійний аналіз, коригування та вдосконалення параметрів і послідовностей виробничих операцій. Використання алгоритмів ШІ, зокрема машинного та глибинного навчання, дозволяє налаштовувати параметри технологічних процесів і досягати вищої продуктивності, зниження витрат, скорочення часу виробництва, зменшення відходів, підвищення якості, зменшення енергоспоживання та матеріальних витрат.

6. Моделювання та симуляції, цифрові двійники – один із ключових етапів життєвого циклу виробу, який реалізується на етапах проєктування, тестування та виробництва. Такі категорії ШІ, як машинне та глибинне навчання, застосовуються для аналізу даних, прогнозування поломок, оптимізації процесів. Ці технології забезпечують створення віртуальних моделей виробничих систем і компонентів для тестування та оптимізації без ризику для фізичного обладнання, що сприяє підвищенню надійності та зниженню витрат на прототипування.

7. Управління ланцюгами постачання – процес, що охоплює весь життєвий цикл виробництва, зосереджуючись на забезпеченні своєчасного надходження матеріалів, комплектуючих і ресурсів для випуску та доставки готової продукції. Цілу низку функцій у цій сфері забезпечують такі категорії ШІ: машинне навчання – для аналізу великих обсягів даних з метою прогнозування попиту, оптимізації запасів і планування закупівель; обробка природної мови – для автоматизації обробки документів, контрактів, комунікацій з постачальниками; роботизація й автоматизація процесів – для автоматизації рутинних операцій, наприклад, оформлення замовлень, відстеження статусу поставок.

Такі технології забезпечують прогнозування попиту, оптимізацію запасів і логістичних операцій на основі аналізу історичних і зовнішніх даних, що дозволяє підтримувати безперервність виробництва та мінімізувати витрати.

8. Адитивне виробництво (3D-друк) використовується на етапах проєктування, прототипування, виробництва та ремонту. ШІ (зокрема машинне та глибинне навчання, комп'ютерний зір) забезпечує створення цифрових моделей виробів, формування геометрій, неможливих при традиційній обробці; 3D-друк дозволяє швидко створювати фізичні прототипи для тестування функціональності або форми, а також виготовляти кінцеві деталі або малі серії без використання традиційних інструментів (пресформ, штампів тощо). Загалом, ці технології сприяють підвищенню якості друку та оптимізації конструкції виробів шляхом топологічної оптимізації, що забезпечує зменшення ваги деталей без втрати міцності та зниження матеріальних витрат.

9. Енергетична ефективність та сталий розвиток – це сфера застосування ШІ, у якій аналізується робота машин та обладнання, виявляються неефективні режими, пропонуються енергозберігаючі налаштування, а також прогнозується вплив виробничих рішень на викиди CO_2 та споживання енергії. Цифрові технології оптимізують теплові та енергетичні процеси у виробничих системах, що сприяє зниженню енергоспоживання, підвищенню екологічної безпеки та стійкості виробництва. У цьому випадку ШІ виконує роль інструменту оптимізації, що допомагає машинобудівним підприємствам зменшити екологічний слід, витрати ресурсів і вплив на довкілля.

10. Взаємодія людина – машина. Роботи зі ШІ, які працюють пліч-о-пліч з людьми, розпізнають дії оператора, адаптуються до змін і навчаються з досвіду. Застосування симуляцій і віртуального навчання на основі сучасних технологій дає змогу безпечно й швидко готувати працівників до роботи з новим обладнанням. Системи на базі комп'ютерного зору здійснюють моніторинг дій персоналу, запобігаючи помилкам і аваріям. ШІ підтримує інженерів у процесах прийняття рішень, автоматизує рутинні операції та розширює професійні можливості працівників, що сприяє підвищенню ефективності праці та безпеки на виробництві.

Зіставлення сфер застосування ШІ у машинобудуванні та відповідних категорій технологій, що використовуються в кожній з них дозволило сформувати табл. 3.

Таблиця 3 – Категорії ШІ та етапи (сфери) їх застосування у машинобудуванні

Сфера застосування	ML	DL	Rule-Based	Explainable AI	Predictive Analytics	CV	Robotics	Fuzzy Logic	NLP	Digital Twins
Проєктування та оптимізація конструкцій	+	+	+							
Передбачувальне обслуговування	+	+	+	+	+		+			+
Автоматизація виробництва та верстатів	+		+			+	+			
Контроль якості та візуальна інспекція	+	+		+		+				
Оптимізація виробничих процесів	+	+	+	+	+			+		
Моделювання, симуляції, цифрові двійники	+	+								+
Управління ланцюгами постачання	+		+		+			+	+	
Адитивне виробництво (3D-друк)	+					+				
Енергоефективність та сталий розвиток	+		+	+	+			+		
Взаємодія людина – машина	+		+	+		+	+		+	

Джерело: складено автором.

Таблиця 4 – Програмні продукти (інструменти) з використанням ШІ для машинобудування

Назва продукту	Призначення	Пояснення	Основні можливості	Розробник, країна
Siemens NX	CAD / CAE / PLM	Платформа для проєктування, симуляцій та управління життєвим циклом продукту. Інтегрує ШІ та машинне навчання для оптимізації процесів проєктування й виробництва.	Топологічна оптимізація, інтеграція з виробництвом	Siemens (Німеччина)
Altair Inspire / HyperWorks	CAE, оптимізація	Платформи для симуляцій, аналізу та оптимізації конструкцій і виробничих процесів із фокусом на мінімізацію ваги та підвищення міцності.	Оптимізація форми, ваги, підготовка до 3D-друку	Altair (США)
Autodesk Fusion 360	CAD / CAE / CAM, генеративне проєктування	Комплексний інструмент для 3D-моделювання (CAD), інженерного аналізу (CAE) та виробничого програмування (CAM). Підтримує генеративне проєктування через модуль *Generative Design Extension*, який застосовує ШІ для автоматичного створення оптимальних конструкцій з урахуванням заданих параметрів (матеріали, методи виробництва, обмеження).	3D-моделювання, симуляції, ШІ-проєктування	Autodesk (США)
PTC Creo + GTO	CAD / CAE, топологічна оптимізація	Система для моделювання та інженерного аналізу з функціями топологічної оптимізації. *Generative Topology Optimization* (GTO) і *Generative Design Extension* (GDX) дозволяють автоматично створювати кілька варіантів конструкцій з різними матеріалами та методами виробництва, скорочуючи час розробки та знижуючи витрати.	Параметричне проєктування, генеративне проєктування	PTC (США)
ANSYS Discovery	CAE, ШІ-симуляції	Інструмент для швидкого моделювання та симуляцій фізичних процесів (механіка, теплообмін, вібрації) із застосуванням ШІ для пришвидшення аналізу.	Швидке моделювання, аналіз структур і тепла	Ansys (США)
Dassault CATIA + 3DEXPERIENCE	CAD / PLM	Інструмент для комплексного проєктування та управління життєвим циклом продукту. Підтримує генеративний ШІ для автоматичного створення конструкцій, оптимізованих за продуктивністю, а також моделювання складних систем і цифрових двійників. Забезпечує колаборацію в межах великих інженерних проєктів.	Складне моделювання, цифрові двійники, колаборація	Dassault Systèmes (Франція)

Джерело: складено автором.

На практиці використання ШІ у машинобудуванні реалізується через програмні продукти. Дослідження показало, що найпоширенішими з них є Siemens NX, Altair Inspire / HyperWorks, PTC Creo та GTO, Autodesk Fusion 360, ANSYS Discovery, Dassault CATIA та 3DEXPERIENCE (табл. 4). Ці рішення об’єднує одна мета — підвищення якості, скорочення часу розробки й зниження витрат [22–28]. Вони застосовують комплексний підхід до розв’язання завдань машинобудування та промислового дизайну й забезпечують: проєктування (CAD – Computer-Aided Design), аналіз і симуляції (CAE – Computer-Aided

Engineering), виробниче програмування (CAM – Computer-Aided Manufacturing, доступне в окремих програмних продуктах), управління життєвим циклом продукції (PLM – Product Lifecycle Management, у деяких), оптимізацію конструкцій і процесів (генеративне проєктування, топологічна оптимізація, ШІ-симуляції).

Висновки. Як показало дослідження, ШІ-системи інтегруються в різні етапи і сфери машинобудування, набуваючи стратегічного значення як ключовий чинник інноваційного розвитку галузі. Машинобудівні корпорації можуть виступати інтеграторами та користувачами цих технологій. Хоча лідерами впровадження залишаються великі корпорації, стартапи та малі й середні підприємства також активно використовують ці технології, адаптуючи їх до власних бізнес-моделей.

З одного боку, ШІ відкриває нові можливості для технологічних трансформацій продуктів (товарів і послуг) та процесів; з іншого — сприяє оптимізації ресурсів, покращенню управлінських рішень і зменшенню негативного впливу на довкілля.

Завдяки широкому спектру технологій, на яких базуються ШІ-системи, істотно прискорюються продуктові інновації. Зокрема, машинне та глибинне навчання дозволяють інженерам створювати нові конструкції з оптимальними характеристиками — легші, міцніші, енергоефективніші. Комп'ютерний зір підвищує точність і якість продукції, забезпечуючи автоматичне виявлення мікродефектів.

Інновації бізнес-процесів, зокрема перехід до передового (smart) виробництва, стають можливими завдяки прогнозній аналітиці (яка дає змогу впровадити предиктивне обслуговування замість планового, зменшуючи простої та витрати), робототехніці (що автоматизує небезпечні або трудомісткі процеси та гарантує стабільну якість), а також системам правил і логіки (які формалізують експертні знання у вигляді систем підтримки прийняття рішень, особливо в нестандартних або кризових ситуаціях).

ШІ сприяє реалізації інновацій, що підвищують гнучкість, адаптивність і масштабованість виробництва. Моделі на основі цих технологій в цифрових двійниках дозволяють тестувати й оптимізувати виробничі сценарії без ризику для реального середовища. Роботизовані системи здатні адаптувати свою поведінку до нових продуктів без потреби в повній перебудові виробничої лінії.

Завдяки сучасному програмному забезпеченню (зокрема CAD/CAE-системам), ШІ-системи стають рушієм інноваційного поступу машинобудування в умовах Індустрії 4.0. Майбутнє галузі пов'язане з розвитком адаптивного виробництва в реальному часі, автономних систем, інтелектуальної робототехніки та повністю автоматизованих середовищ проєктування, що докорінно змінює підходи до створення техніки.

Водночас, попри широку інтеграцію ШІ, він не замінює інженерів, а розширює їхні можливості, залишаючи за ними ключову роль у прийнятті інноваційних рішень. Для ефективного впровадження нових цифрових технологій в машинобудуванні необхідно нарощувати міждисциплінарні компетентності: програмування, аналіз даних, знання алгоритмів ШІ та глибоке розуміння механічних систем.

Отже, ШІ не лише трансформує підходи до проєктування й виробництва, а й формує нову парадигму машинобудування — інтелектуальну, адаптивну та стійку до викликів сучасності.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор використовував ChatGPT для оформлення списку використаних джерел за міжнародним бібліографічним стандартом APA, а також для перевірки граматики. Після використання цього інструменту/сервісу автор бере на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Artificial Intelligence in Industry - the road to a European success: Statement of the VDMA on the White Paper of the EU Commission (COM (2020) 65 final) (2020). https://www.vdma.eu/documents/34570/1052572/White%2520Paper%2520AI%2520European%2520Commission%2520June%25202020_1592311336948.pdf.

2. Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.

3. Windmann, A., Wittenberg, P., Schieseck, M., & Niggemann, O. (2024). Artificial intelligence in Industry 4.0: A review of integration challenges for industrial systems. *2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1–8. https://doi.org/10.1109/INDIN58382.2024.10774364.

4. Plathottam, S. J., & Iloeje, C. O. (2023). A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. https://doi.org/10.1002/amp2.10159.

5. Santos, M., Martinez, E., & Hernandez, C. (2024). The role of artificial intelligence in modernizing mechanical engineering and industrial innovation. *International Journal of Industrial Innovation and Mechanical Engineering, 1*(2), 13–17. https://doi.org/10.61132/ijiime.v1i2.54.

6. Mondal, S., & Goswami, S. S. (2024). Rise of intelligent machines: Influence of artificial intelligence on mechanical engineering innovation. *Spectrum of Engineering and Management Sciences, 2*(1), 46–55. https://doi.org/10.31181/sems1120244h.

7. Balagopal, P. (2024). Impact of artificial intelligence on mechanical engineering: A comprehensive overview. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24jul1389.

8. Yoo, S., Lee, S., Kim, S., et al. (2021). Integrating deep learning into CAD/CAE system: Generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 64*, 2725–2747. https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9.

9. Fatima, Z., Mohiuddin, G., & Khan, M. U. (2023). An overview: Revolutionizing mechanical engineering through the application of artificial intelligence. B *An Overview: Revolutionizing Mechanical Engineering through the Application of Artificial Intelligence* (pp. 275–293). MKSES Publication. https://doi.org/10.5281/zenodo.10321773.

10. Dhandapani, C. (2019). Implementation of machine learning (ML) in mechanical engineering application using artificial intelligence (AI). *Science, Technology and Development*. https://ssrn.com/abstract=3687863.

11. Zajacko, I., Gal, T., Sagova, Z., Mateichyk, V., & Wiecek, D. (2012). Application of artificial intelligence principles in mechanical engineering. *MATEC Web of Conferences, 244*, 1–7. https://doi.org/10.1051/matecconf/201824401027.

12. Blake, R. W., Mathew, R., George, A., & Papakostas, N. (2021). Impact of artificial intelligence on engineering: Past, present and future. *Procedia CIRP*. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.291.

13. Park, J., & Kang, D. (2024). Artificial intelligence and smart technologies in safety management: A comprehensive analysis across multiple industries. *Applied Sciences, 14*(24), 11934. https://doi.org/10.3390/app142411934.

14. AI Act (2024). https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai.

15. Monostori, L. (2014). Artificial intelligence. In L. Laperrière & G. Reinhart (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16703.

16. IBM. (2024). What is artificial intelligence (AI)? https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence.

17.50 AI Scientist Interview Questions & Answers (2025). https://digitaldefynd.com/IQ/ai-scientist-interview-questions/.

18.OECD/Eurostat (2018), Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities https://doi.org/10.1787/9789264304604-en.

19. Khan, S. A., Chowdhury, M. M. H., & Nandy, U. (2023). AI robotics technology: A review. *Journal of Engineering Research and Reports, 25*(10), 187–194. https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i101011.

20. Arinez, J. F., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C., & Zhang, J. (2020). Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, 142*(11), 110804. https://doi.org/10.1115/1.4047855.

21. Nti, I. K., Adekoya, A. F., Weyori, B. A., et al. (2022). Applications of artificial intelligence in engineering and manufacturing: A systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing, 33*, 1581–1601. https://doi.org/10.1007/s10845-021-01771-6.

22. Autodesk. Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. https://www.autodesk.com/nz/products/fusion-360/overview.

23. Autodesk Fusion Blog. https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog#case-studies.

24. Siemens. AI in manufacturing: Transforming engineering, production and supply chains. https://blogs.sw.siemens.com/tecnomatix/ai-in-manufacturing-transforming-engineering-production-and-supply-chains/?utm_source=chatgpt.com.

25. Altair. (2024). Introducing the new Altair® HyperMesh® experience. https://altair.com/blog/executive-insights/introducing-the-new-altair-hypermesh-experience.

26. PTC. (2022). Creo GTO and GDX – Which one to use, and when. https://www.ptc.com/en/blogs/cad/creo-gto-gdx-which-use-when.

27. Ansys. Ansys Discovery: Rapid design exploration. https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery.

28. Dassault Systèmes. 3DEXPERIENCE Make within CATIA. https://www.3ds.com/make/solutions/addin/catia.

Отримано 19.08.2025

UDC 004.896:007.52

Mykhailo Salikhov

Postgraduate student
Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: mykhailosalikhov@gmail.com. **ORCID**: https://orcid.org/0009-0003-7356-5344

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MECHANICAL ENGINEERING TO ACCELERATE TECHNOLOGICAL INNOVATIONS

In the article, the approaches to interpreting the concept of the Artificial Intelligence (AI) in the context of its application in mechanical engineering are summarized. It is established that AI goes beyond merely imitating human functions and is based on the ability of systems to perceive, analyze information, act autonomously, and adapt. Based on the EU's approach to defining AI systems, six key characteristics relevant to mechanical engineering are outlined, namely: machine nature, autonomy, post-deployment learning, input data processing, output generation, and influence on physical or virtual environments. It is specified that an AI system in mechanical engineering is an integrated hardware-software complex capable of self-learning and optimization.

The study identifies AI categories widely used in mechanical engineering, including Machine Learning, Deep Learning, Rule-Based Systems, Computer Vision, Robotics, Predictive Analytics, and Explainable AI. The influence of different AI categories on innovations in mechanical engineering is analyzed. It is shown that each category plays a specific role in design, manufacturing, maintenance, and optimization.

Ten areas within mechanical engineering where AI is actively applied are identified, namely: design and structural optimization, predictive maintenance, manufacturing and machine tool automation, quality control and visual inspection, production process optimization, modeling and simulation, digital twins, supply chain management, additive manufacturing (3D printing), energy efficiency and sustainable development, and human–machine collaboration. It is demonstrated that different AI categories are employed in each area, facilitating innovation in products and processes.

Examples of software solutions implementing AI and accelerating innovation in mechanical engineering are also examined.

***Keywords**: artificial intelligence; mechanical engineering; innovation; machine learning; deep learning; robotics; design; production automation.*

Table: 4. References: 28.

Саліхов М. М. Використання штучного інтелекту в машинобудуванні для прискорення технологічних інновацій. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 18-29. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)- 18-29.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-30-39
УДК 686.12.056

Олег Богданович Книш[1], Юрій Юрійович Білозор[2]

[1]доктор технічних наук, професор, професор кафедри
комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: Oleh.B.Knysh@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5854-1879. **Scopus Author ID:** 57209411556

[2]аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: yurijbilozor05@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-8660-499X

ПАРАМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ОБРОБКИ КНИЖКОВИХ БЛОКІВ ЦИЛІНДРИЧНОЮ ФРЕЗОЮ З ПАСИВНИМ ПРИВОДОМ У МАШИНАХ НЕЗШИВНОГО СКРІПЛЕННЯ

Важливим етапом технологічного процесу виготовлення книжкової продукції, скріпленої незшивним клейовим способом, є підготовка корінців до нанесення клею. Одним із напрямків удосконалення обробки корінців книжкових блоків є застосування циліндричної фрези із пасивним приводом та додатковим осьовим переміщенням. У статті отримали подальший розвиток напрацювання авторів, що присвячені параметричним дослідженням кінематики обробки книжкових блоків циліндричною фрезою. Розроблено методику розрахунку швидкості різання та кінематичних кутів різання. Для досліджень використано три закони періодичного руху кулачкового механізму. Встановлено визначальний вплив на кінематичні параметри обробки книжкових блоків циліндричною фрезою закону періодичного руху кулачкового механізму осьового переміщення фрези.

Ключові слова: *циліндрична фреза; лезо; різання; книжковий блок; швидкість; кут різання; торцевий кулачок; закон періодичного руху.*

Рис.: 6. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Книговидання є одним із пріоритетів інформаційної безпеки України. Про це свідчить і сумна статистика злочинів російського агресора зі знищення друкарень та видавництв в Україні, навчальної та художньої літератури на тимчасово окупованих територіях. Завдання фахівців видавничо-поліграфічного комплексу – збереження, розвиток та удосконалення потенціалу книговидання в Україні.

Одним із таких напрямків є удосконалення технології виготовлення книжково-журнальної продукції, скріпленої незшивним клейовим способом (НКС). Це дозволить забезпечити необхідну її якість при зменшенні собівартості. Особливо актуально це при виготовленні навчальної літератури, номенклатура якої змінюється з кожним роком у зв'язку з розробленням і впровадженням у навчальний процес нових освітніх програм.

Постановка проблеми. Важливим етапом технологічного процесу виготовлення книжково-журнальної продукції незшивним клейовим способом є операція скріплення клеєм. Саме вона значною мірою визначатиме надалі експлуатаційні показники видання – міцність, довговічність, здатність до розкриття. Рівень перелічених показників визначається двома факторами [1; 2]: клеєм та якістю підготовки корінця книжкового блока до нанесення клею. У цій статті розглядається питання удосконалення механічної обробки корінця циліндричною фрезою з пасивним приводом. Існуюча технологія передбачає багатоступеневу обробку корінця кількома (до 4-5) послідовно розміщеними інструментами. Їхня сумарна потужність сягає 5-7 кВт, а габарити (довжина секції) – до двох метрів. Серед інших недоліків – значний шум при роботі інструментів та інтенсивне виділення паперового пилу.

Для вирішення такої проблеми пропонується застосування інструменту для обробки корінців – циліндричної фрези з пасивним приводом завдяки фрикційному контакту із книжковим блоком. Для мінімізації технологічних зусиль та створення кращих передумов клейового скріплення передбачено додаткове осьове переміщення фрези завдяки кулачковому механізму.

© О. Б. Книш, Ю. Ю. Білозор, 2025

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті досліджується кінематика різання книжкових блоків лезами циліндричної фрези. Наявна у відкритому доступі література засвідчує про широке коло досліджень теорії різання різноманітних матеріалів. Так, у роботі [3] досліджено характер зміни кута загострення леза бітерно-ножового різального апарату при різанні стеблової маси. Автори дослідили вплив технологічних параметрів на коефіцієнти ковзання, кінематичної трансформації кута загострення ножа.

У праці [4] досліджено механіку дискового різального інструмента з метою визначення сил, що діють на нього, як функції параметрів, які характеризують його рух. Особливістю процесу є те, що дисковий інструмент обертається ексцентрично з постійною кутовою швидкістю навколо вторинної осі. Авторами отримано важливі результати й моделі поведінки та силового навантаження дискового інструмента в процесі різання твердих порід.

Автори [5; 6] досліджують трансформацію кінематичних кутів різання книжкових блоків ексцентрично закріпленим дисковим ножем. Встановлено, що залежно від технологічних параметрів можливе безперервне різання з постійним контактом різальної крайки з матеріалом та дискретне різання з імпульсною дією ножа на книжковий блок. За результатами досліджень автори запропонували рішення, які унеможливлюють негативний вплив ексцентричного кріплення дискового ножа на динаміку пристрою та цілої машини загалом.

У патенті на винахід [7] запропоновано пристрій для різання книжкових блоків. Він передбачає застосування дискових різальних інструментів, синхронізованих із транспортером, так що різальний інструмент зрізує верхній та/або нижній край продукції. Недоліком такого пристрою є обмеження щодо застосування у машинах незшивного скріплення, де передбачена обробка книжкових блоків лише з одного краю, як правило, нижнього.

У публікаціях [8-10] досліджено кінематику різання книжкових блоків дисковими ножами. Так, у роботі [8] виведено залежності для складових швидкості різання та встановлено їхній вплив на трансформацію кута загострення ножа. Визначено вплив напрямку руху (зустрічний чи попутній) ножа відносно книжкового блока на кути різання. Досліджено вплив геометричних розмірів інструменту та технологічних параметрів процесу на зміну кута різання. Розроблено рекомендації щодо мінімізації кутів різання при обробці книжкових блоків. У роботі [9] досліджено кінематику різання дисковими ножами з двостороннім планетарним приводом. Визначено умови різання, досліджено зміну кінематичних кутів різання. У статті [10] наведено методику та результати параметричних досліджень різання книжкових блоків дисковими ножами з одностороннім планетарним приводом. Встановлено кількісні та якісні характеристики «ковзаючого» різання книжкових блоків. Виявлено домінуючий вплив на значення коефіцієнта ковзання дотичної складової швидкості різання. Виведено залежності та проаналізовано характер зміни коефіцієнта трансформації кута загострення дискового ножа.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Обробка корінців книжкових блоків циліндричною фрезою розглянута науковцями у роботах [11-13]. У роботі [11] досліджено інерційні навантаження фрези при різних законах періодичного руху (ЗПР) кулачкового механізму її осьового переміщення. У [12] наведено результати експериментальних досліджень обробки книжкових блоків циліндричною фрезою із пасивним приводом без осьового переміщення. Кінематичні параметри руху циліндричної фрези та віртуальну симуляцію роботи пристрою з урахуванням її обертового та осьового переміщення досліджено у роботі [13]. За результатами аналітичних досліджень та віртуального експерименту встановлено їхню абсолютну ідентичність.

Проте недослідженим залишається питання кінематики різання корінців книжкових блоків лезами циліндричної фрези з пасивним приводом з урахуванням її осьового переміщення завдяки застосуванню нерухомого торцевого кулачка.

Мета статті – дослідити кількісні та якісні характеристики швидкості різання та кінематичних кутів різання при обробці корінців книжкових блоків циліндричною фрезою з пасивним приводом та додатковим осьовим переміщенням у машинах незшивного скріплення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливим, крім того, є питання аналізу кінематичних параметрів обробки корінців книжкових блоків циліндричною фрезою з пасивним приводом та додатковим осьовим переміщенням. Він передбачає визначення швидкості різання, кінематичних кутів різання.

Розрахункова схема до визначення швидкості різання лезами циліндричної фрези у проєкційному зв'язку зображена на рис. 1. Тут прийнято наступні позначення: *КБ* – книжковий блок; $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$ – поточні положення леза циліндричної фрези відповідно у момент врізання, крайньому нижньому та при виході із книжкового блока; R – зовнішній радіус циліндричної фрези; h – глибина насічок; $V_Б$ = const – швидкість переміщення книжкових блоків; $V_{Фп}$ – нормальна складова швидкості фрези; $V_{Фτ}$ – колова швидкість фрези; $V_{Фос}$ – осьова складова швидкості фрези; $V_р$ – швидкість різання; φ – кут повороту фрези.

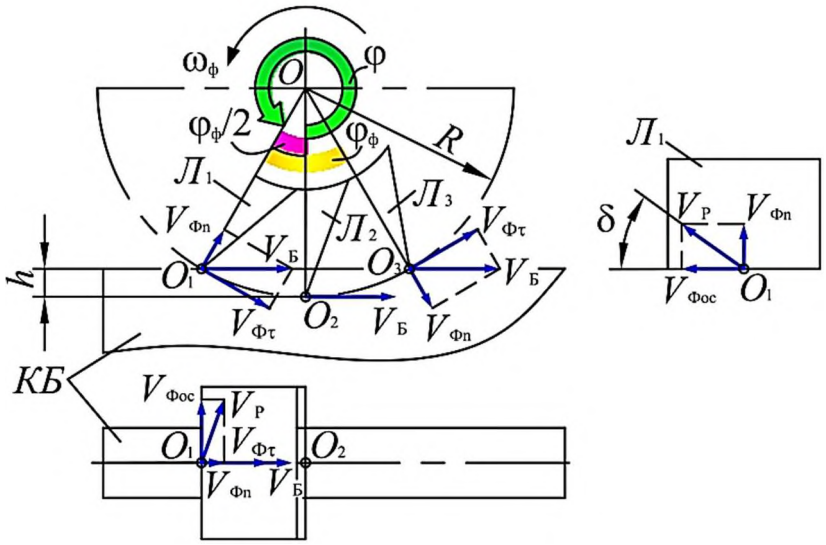


Рис. 1. Схема до визначення швидкості різання

Джерело: розроблено авторами.

Складові швидкості фрези визначаємо за залежностями:

$$V_{Фп} = V_Б \cdot \sin\varphi;\ V_{Фτ} = V_Б \cdot \cos\varphi\,. \qquad (1)$$

Оскільки обертання фрези здійснюється завдяки її прокочуванню по корінцю книжкового блока *КБ*, а не примусовому електромеханічному приводу, прикладеному до т. *O*, то колова швидкість фрези буде змінною і залежатиме від глибини h насічок.

Поточні значення осьової $V_{Фос}$ швидкості фрези у кулачковому механізмі визначаємо за відомою методикою [14] у модульній системі [*m, S, T*]:

$$V_{Фос} = b_к \cdot \frac{S}{T}, \qquad (2)$$

де $b_к$ – інваріант швидкості, що визначається законом періодичного руху кулачка [14];

S – модуль осьового переміщення фрези;

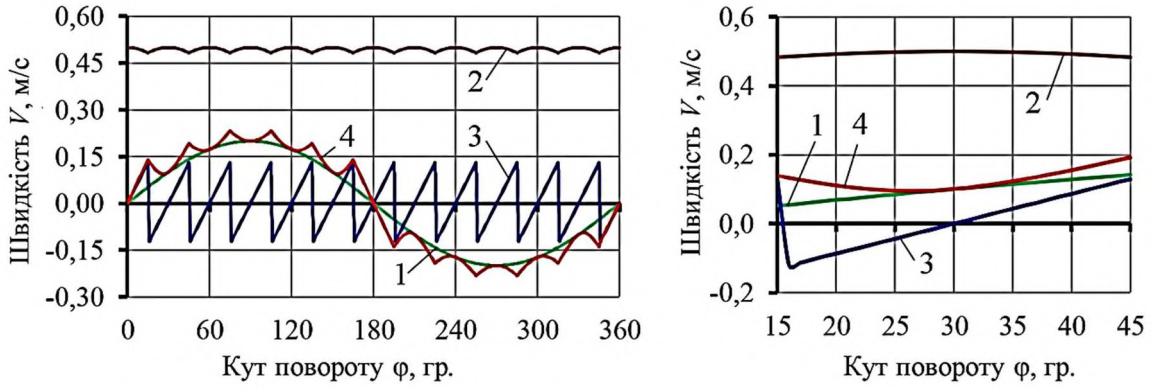
T=φв/ω= φв·R/$V_Б$ – час осьового переміщення фрези (період віддалення).

Швидкість різання визначаємо як векторну суму швидкості блока та осьової швидкості фрези [10]. У нашому випадку проєктуємо швидкість блока у площину різання і знаходимо швидкість різання (рис. 1):

$$V_{\text{р}} = \sqrt{V_{\text{Фп}}^2 + V_{\text{Фос}}^2} = \sqrt{\left(V_{\text{Б}} \cdot \sin\varphi\right)^2 + \left(b_{\text{к}} \cdot \frac{S}{T}\right)^2}\ . \qquad (3)$$

Розрахунок швидкостей проводимо для початкових даних з урахуванням попередньо проведених аналітичних та експериментальних досліджень [12]: швидкість переміщення книжкових блоків $V_{\text{Б}} = 0{,}5$ м/с; осьове переміщення фрези $S = 20$ мм; радіус фрези $R = 25$ мм; глибина насічок $h = 0{,}9$ мм; ЗПР «Косинусоїда»; фазові кути віддалення $\varphi_{\text{в}} = 180°$ та наближення $\varphi_{\text{н}} = 180°$; кут між лезами $\varphi_{\text{ф}} = 30°$ (кількість лез $z = 12$). За початок координат прийнято т. O_2 – крайнє нижнє положення леза відносно корінця книжкового блока.

На рис. 2, *а* зображено графіки залежності швидкостей від кута φ повороту фрези для її повного оберту, що показує характер їхньої зміни для кожного із 12 лез. На рис. 2, *б* зображено характер зміни швидкостей для одного леза при куті $\varphi_{\text{ф}} = 15°$-$45°$.



а *б*

Рис. 2. Графіки залежності швидкості від кута повороту фрези для її повного оберту (а), для одного леза (б):
1 – осьової $V_{\text{Фос}}$ швидкості фрези, 2 – колової $V_{\text{Фτ}}$ швидкості фрези, 3 – нормальної складової $V_{\text{Фп}}$ швидкості фрези, 4 – швидкості $V_{\text{р}}$ різання

Джерело: розроблено авторами.

Як бачимо із графіків на рис. 2, *а*, характер зміни кожної з досліджуваних швидкостей значно різниться. Очевидно, що осьова складова $V_{\text{Фос}}$ (крива 1) залежить від закону періодичного руху, а характер її зміни є відомим [14]. Щодо зміни колової $V_{\text{Фτ}}$ швидкості фрези (крива 2), то її абсолютне значення змінюється мінімально. У нашому випадку $V_{\text{Фτmax}} = 0{,}5$ м/с у крайньому нижньому положенні фрези, а мінімальне значення $V_{\text{Фτmin}} = 0{,}483$ м/с у момент врізання леза у книжковий блок та при завершенні різання при значеннях кута повороту фрези із кроком $\Delta\varphi = 30°$ (як приклад, на рис. 2, *б* при $\varphi = 15°$ та $\varphi = 45°$ відповідно). Різниця між максимальним та мінімальним значенням становить $\Delta V_{\text{ф}} = 0{,}017$ м/с або 3,4 %. Очевидно, що при зменшенні глибини насічок різниця між максимальною та мінімальною коловими швидкостями ще зменшиться.

Нормальна складова швидкості фрези (крива 3) має циклічний характер зміни, що характеризується стрімким зростанням (спаданням) з нуля до максимуму (мінімуму) в діапазоні $V_{\text{Фп}} = \pm 0{,}129$ м/с. Пікові значення спостерігаються при врізанні леза у корінець книжкового блока при $\varphi = 15°$ та при завершенні різання при $\varphi = 45°$ (рис. 2, *б*). У крайньому нижньому положенні леза (т. O_2 рис. 1) нормальна складова швидкості фрези рівна $V_{\text{Фп}} = 0$. Логічно, що саме в цьому положенні максимальною є колова швидкість фрези.

Графік залежності швидкості різання зображено на рис. 2 (крива 4). Як бачимо з рис. 2, *а*, швидкість різання змінюється циклічно. У крайніх осьових положеннях фрези при φ = 0° (360°) та φ = 180° її значення рівне $V_р = 0$. Це логічно, оскільки у цих положеннях і осьова швидкість, і нормальна складова швидкості фрези рівні нулю. Слід зазначити, що на фазі віддалення кулачкового механізму при $\varphi_в$ = 0-180° загальний характер зміни швидкості різання нагадує криву осьової швидкості фрези, на яку накладені коливання, спричинені зміною нормальної складової швидкості кожного леза фрези. На фазі наближення кулачкового механізму при $\varphi_н$ = 180-360° характер зміни швидкості різання симетричний фазі віддалення. При цьому напрямок вектора швидкості різання змінюється на протилежний, а модуль – аналогічний фазі віддалення, що пояснюється залежністю (3).

Проведено дослідження зміни швидкості різання для трьох ЗПР, найбільш уживаних у поліграфічному машинобудуванні: «Косинусоїда», «Синусоїда», «Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23» [14]. Відповідні графічні залежності зображено на рис. 3. Як бачимо із графіків, характер зміни швидкості різання для досліджуваних ЗПР є ідентичним. Щодо кількісних показників, то швидкість різання зростає з нуля у крайніх положеннях фрези до максимуму на половині циклів віддалення (наближення). Так, максимальне значення швидкості різання спостерігається для ЗПР «Синусоїда» і становить V_{pmax} = 0,27 м/с. Для ЗПР «Косинусоїда» V_{pmax} = 0,232 м/с, а для ЗПР ««Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23» – V_{pmax} = 0,243 м/с. Це пояснюється характеристиками даних ЗПР, для яких у випадку «Синусоїди» константа піка швидкості є максимальною і становить *B* = 2,0, а для інших двох ЗПР («Косинусоїда», «Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23») *B*=1,57 та *B*=1,68 відповідно [14].

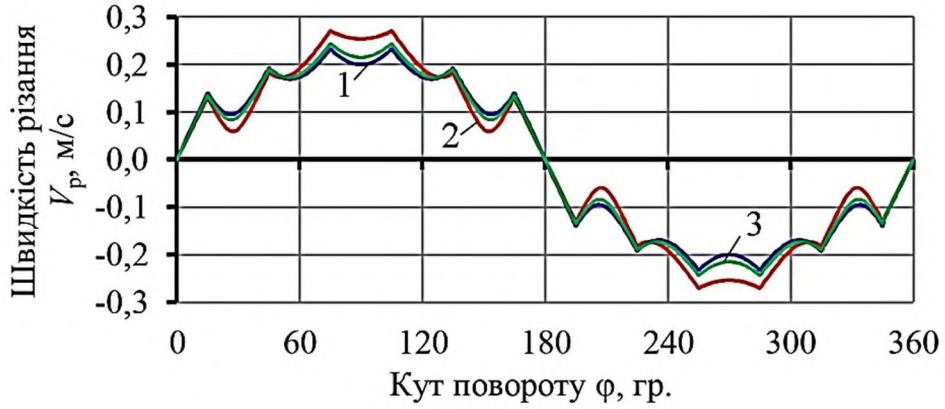


Рис. 3. Графіки залежності швидкості різання від кута повороту фрези для: ЗПР «Косинусоїда» (1), ЗПР «Синусоїда» (2), ЗПР «Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23»
Джерело: розроблено авторами.

Важливим параметром при дослідженні кінематики різання книжкових блоків є кінематичний кут $\alpha_{кр}$ різання. Він утворюється січною площиною *OAB*, перпендикулярною до площини різання (рис. 4). Положення січної площини визначається напрямком вектора швидкості $V_р$ різання.

Кінематичний кут різання плоским ножем (у нашому випадку лезом циліндричної фрези) визначається залежністю [15]:

$$\alpha_{кр} = \operatorname{arctg}\left(\operatorname{tg}\alpha_з \cdot \sin\delta\right) \quad (4)$$

де $\alpha_з$ – кут загострення ножа,
δ – кут, що визначає положення вектора швидкості різання $V_р$.

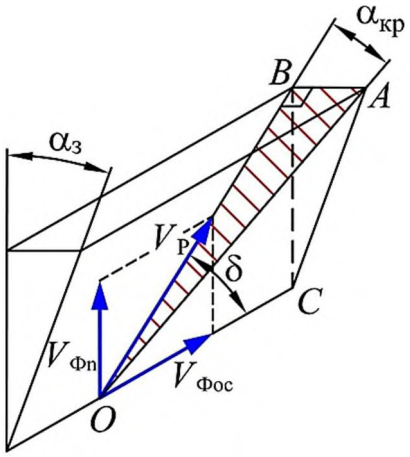


Рис. 4. Схема до розрахунку кінематичного кута різання
Джерело: розроблено авторами.

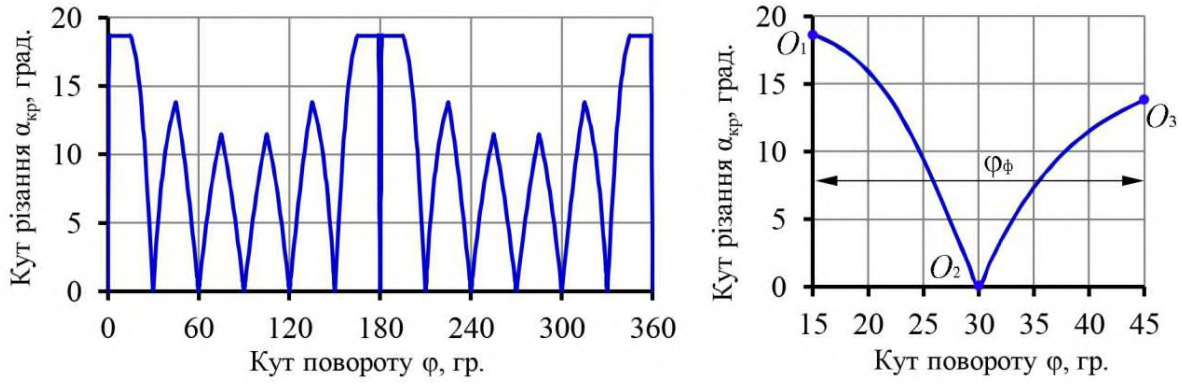
Кут δ знаходимо із геометричної залежності (рис. 4):

$$\delta = \operatorname{arctg}\frac{V_{\Phi n}}{V_{\Phi oc}} \tag{5}$$

Після підстановки (1) і (2) у формулу (5) та (5) у (4) отримаємо кінцеву залежність для визначення кінематичного кута різання книжкових блоків лезом циліндричної фрези:

$$\alpha_{кр} = \operatorname{arctg}\left(\operatorname{tg}\alpha_з \cdot \sin\left(\operatorname{arctg}\frac{V_Б \cdot \sin\varphi}{b_k \frac{S}{T}} \right) \right) \tag{6}$$

На рис. 5, *а* зображено результати досліджень зміни кінематичного кута різання для повного оберту фрези для всіх її 12 лез, а на рис. 5, *б* – для одного леза при куті повороту фрези φ = 15°-45°.



а *б*

Рис. 5. Графіки залежності кінематичного кута різання від кута повороту фрези: для повного оберту фрези (а), для одного леза фрези (б)
Джерело: розроблено авторами.

Як видно із графіків, кінематичний кут різання кожним лезом із максимуму при врізанні (т. O_1) у книжковий блок спадає до нуля посередині (т. O_2) циклу різання і далі знову сягає максимального значення при виході (т. O_3) леза із книжкового блока. Такий харак-

тер зміни кінематичного кута різання пояснюється наявністю нормальної складової швидкості $V_{Фn}$ фрези на початку входження (т. O_1, рис. 1) леза у книжковий блок, при виході (т. O_3, рис. 1) із книжкового блока та $V_{Фn} = 0$ у нижньому положенні леза (т. O_2, рис. 1), коли різання відсутнє.

На рис. 6 зображено графік залежності максимальних кінематичних кутів різання для кожного із 12 лез від кута повороту фрези для 3-х ЗПР: «Косинусоїда» (1), «Синусоїда» (2), «Поліном 5-го ст. α = -5,δ = -0,23». Для згаданих ЗПР розрахунок осьової швидкості фрези проведено за залежністю (2), при цьому інваріанти b_k для кожного із ЗПР розраховані за методикою [14].

Характер залежності кінематичного кута різання для кожного із ЗПР подібний. Як бачимо із рис. 6, при фазових кутах φ = 0°-30° та φ = 330-360° кінематичний кут різання залишається незмінним. Очевидно це пояснюється тим, що при відповідних кутах різниця між осьовою швидкістю фрези $V_{Фос}$ та нормальною складовою $V_{Фn}$ є незначною і мало впливає на кут δ напрямку вектора швидкості різання. При збільшенні фазового кута віддалення кулачкового механізму понад $φ_в > 30°$ спостерігається стрімке зменшення кінематичного кута різання. Це пояснюється зростанням осьової швидкості ножа (крива 1, рис. 2, *а*) і її домінуючим впливом на величину швидкості різання. При $φ_в > 150°$, коли осьова швидкість фрези знову зменшується до нуля, спостерігається зростання кута різання. При фазовому куті наближення $φ_н = 180\text{-}360°$ характер зміни кута різання аналогічний ділянці віддалення.

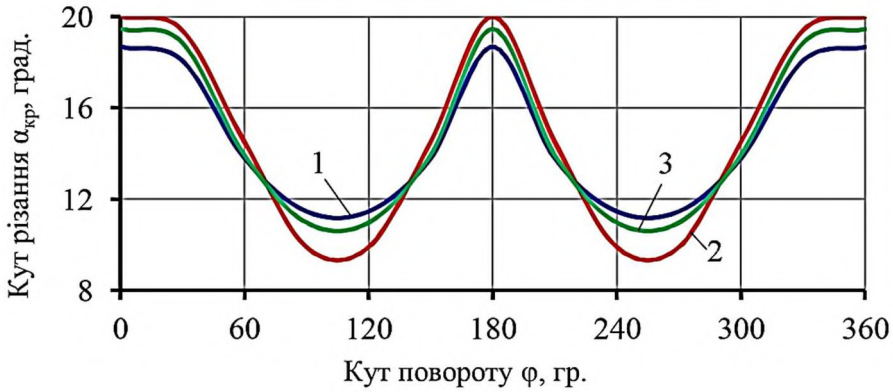


Рис. 6. Графіки залежності максимального кінематичного кута різання від кута повороту фрези для: ЗПР «Косинусоїда» (1), ЗПР «Синусоїда» (2), ЗПР «Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23»

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз впливу ЗПР на максимальні значення кутів різання засвідчує наступне. Лише для одного із розглянутих ЗПР («Синусоїда», крива 2) кут $α_{кр}$ різання сягає величини кута загострення $α_{кртах} = α_з = 20°$. Для ЗПР «Поліном 5-го ст. α = -5,δ = -0,23» $α_{кртах} = 19{,}5°$, а для ЗПР «Косинусоїда» – $α_{кртах} = 18{,}7°$. При цьому для ЗПР «Синусоїда» найменше із максимальних значень кута різання становить $α_{кртіn} = 9{,}9°$, а для ЗПР «Косинусоїда» – $α_{кртіn} = 11{,}5°$.

З огляду на кількісні показники зміни кутів різання та їхню мінімізацію очевидно слід рекомендувати ЗПР «Поліном 5-го ст. α=-5,δ=-0,23» для кулачкового механізму осьового переміщення циліндричної фрези, для якого $α_{кртах} = 19{,}5°$, а $α_{кртіn} = 11{,}1°$.

Висновки. Проведено аналіз наукових праць з кінематики різання книжкових блоків та у галузевому машинобудуванні. Встановлено, що недослідженим є питання кінематики обробки корінців книжкових блоків лезами циліндричної фрези. З огляду на це завдання окреслено мету статті.

Розроблено методику досліджень кінематичних параметрів обробки книжкових блоків циліндричною фрезою – швидкості різання та кінематичних кутів різання. Визначено характер зміни та кількісні показники швидкості різання. Встановлено, що характер зміни швидкості різання визначається ЗПР кулачкового механізму осьового переміщення фрези з накладанням коливань нормальної складової швидкості фрези. Аналіз кількісних показників зміни швидкості різання показав, що максимальне значення швидкості різання спостерігається для ЗПР «Синусоїда» і становить V_{pmax} = 0,27 м/с. Відповідно для ЗПР «Косинусоїда» V_{pmax} = 0,232 м/с, а для ЗПР ««Поліном 5-го ст. α = -5,δ = -0,23» – V_{pmax} = 0,243 м/с. Результати дослідження швидкості різання засвідчують, що визначальний вплив на неї має швидкість осьового переміщення фрези.

Досліджено кінематичні кути різання. Встановлено, що як і у випадку швидкості різання, визначальний вплив на їхню зміну має ЗПР кулачкового механізму осьового переміщення фрези. Щодо числових значень, то лише для ЗПР «Синусоїда» кут різання сягає величини кута загострення і становить 20°.

За результатами параметричних досліджень кінематики обробки корінців книжкових блоків циліндричною фрезою рекомендовано ЗПР «Поліном 5-го ст. α = -5, δ = -0,23» для кулачкового механізму осьового переміщення циліндричної фрези, при якому різниця між максимальним і мінімальним значеннями кінематичного кута різання становить 8,4°, що є найменшим значенням для досліджуваних ЗПР. Це сприятиме мінімальному впливу коливань технологічних навантажень на привод машини незшивного скріплення.

Список використаних джерел

1. Preprotić, S., Lajić, B., & Jurečić, D. (2011). Perfect binding technique affects the paperback adhesive binding strength. *Paper presented at the 15th International Conference of Printing and Graphic Communications Blaž Baromić 2011 proceedings*. Senj, Croatia, 21–24 September 2011, 428-436.

2. Havenko, S., Pikh, I., Kulik, L., Konyukhova, I., Rybka, R., & Vorzheva, O. (2019). Research of the backing technology of the book block spine. *Journal of Graphic Engineering and Design*, *11*, 27-35.

3. Середа, Л. П., Кузьменко, В. Ф., & Холодюк, О. В. (2012). Вплив трансформації кута загострення леза у процесі різання. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*, *11 т.1 (65)*, 299-306. https://repository.vsau.org/getfile.php/6530.pdf.

4. Dehkhoda, S., Detournay, E. (2017). Mechanics of Actuated Disc Cutting. *Rock Mech Rock*, *50*, 465-483.

5. Janicki, P., & Petriaszwili, G. (2017). Transformacja kinematycznego kąta zaostrzenia ostrza noża w procesach rozkroju tektury i papieru nożami krążkowym. *Opakowanie*, *9*, 79-81. DOI: 10.15199/54.2017.7.1.

6. Petriaszwili, G., Janicki, P., & Komarov, S. (2020). Investigations on book cutting by circular knife with eccentric blade movement. In *10th international symposium on graphic engineering and design*. University of Novi Sad, Faculty of technical sciences, Department of graphic engineering and design. https://doi.org/10.24867/grid-2020-p24.

7. Device for trimming the top and/or bottom edge of printed products moved through a cutting tool (2014). B26D5/00; B26D1/00; B27B5/00; B27B25/02; B42B2/00; B65H39/00; B65H39/02; B65H41/00. US patent 8752463B2. Marcel Buerge.

8. Книш, О. Б. (2014). Дослідження трансформації кута загострення дискового ножа при обробці корінця книжкового блока перехресним способом. *Технологічні комплекси*, *1*, 154-159.

9. Іванко, А. І. (2003). Кінематика процесу обрізування книжкового блока дисковими ножами з планетарним приводом. *Технологія і техніка друкарства*, *2*, 78-81.

10. Книш, О. Б. (2021). Дослідження кінематики беззупинного різання книжкових блоків дисковими ножами з планетарним приводом. *Поліграфія і видавнича справа, 1*, 62-71.

11. Книш, О. Б., Регей, І. І., & Бегень, П. І. (2020). Дослідження інерційних навантажень пристрою обробки корінців книжкових блоків у машині незшивного скріплення. *Технологія і техніка друкарства*, *4*, 42-52.

12. Knysh, O., Rehei, I., Kandiak, N. & Ternytskyi, S. (2019). Experimental evaluation of the tractive effort of the chain conveyor during book block spine processing by cylindrical milling cutter at perfect binding. *Acta mechanica et automatica*, *Vol.13 № 2*, 101-106. DOI: 10.2478/ama-2019-0014.

13. Книш, О. Б., Бегень, П. І., Білозор, Ю. Ю., & Білик, О. А. (2025). Дослідження кінематики руху циліндричної фрези при обробці книжкових блоків у машинах незшивного скріплення. *Технічні науки та технології*, *2*, 9-19. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-9-19.

14. Полюдов, О. М. (2005). *Механіка поліграфічних і пакувальних машин*. УАД.

15. Топольницький, П. В., Книш, О. Б., Коломієць, А. Б. (2023). *Сучасні технології обрізування книжково-журнальних блоків*. УАД.

References

1. Preprotić, S., Lajić, B., & Jurečić D. (2011). Perfect binding technique affects the paperback adhesive binding strength. *Paper presented at the 15th International Conference of Printing and Graphic Communications Blaž Baromić 2011 proceedings*. Senj, Croatia, 428-436.

2. Havenko S., Pikh I., Kulik L., Konyukhova I., Rybka R., & Vorzheva O. (2019). Research of the backing technology of the book block spine. *Journal of Graphic Engineering and Design*, *11*, 27-35.

3. Sereda L. P., Kuzmenko V. F., & Kholodiuk O. V. (2012). Vplyv transformatsii kuta zahostrennia leza u protsesi rizannia [Influence of the transformation of the knife sharpening angle in the cutting process]. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu – Collection of scientific works of Vinnytsia National Agrarian University*, *11*(65), 299-306. https://repository.vsau.org/getfile.php/6530.pdf.

4. Dehkhoda S., Detournay E. (2017). Mechanics of Actuated Disc Cutting. *Rock Mech Rock*, *50*, 465-483.

5. Janicki P., & Petriaszwili G. (2017). Transformacja kinematycznego kąta zaostrzenia ostrza noża w procesach rozkroju tektury i papieru nożami krążkowym [Transformation of the kinematic angle of the knife blade sharpening in the processes of cutting cardboard and paper with circular knives]. *Opakowanie*, *9*, 79-81. DOI: 10.15199/54.2017.7.1.

6. Petriaszwili, G., Janicki, P., & Komarov, S (2020). Investigations on book cutting by circular knife with eccentric blade movement. *Paper presented at the 10th International Symposium on Graphic Engineeringand Design GRID 2020*, 229-233. DOI:10.24867/GRID-2020-p24.

7. Device for trimming the top and/or bottom edge of printed products moved through a cutting tool (2014). B26D5/00; B26D1/00; B27B5/00; B27B25/02; B42B2/00; B65H39/00; B65H39/02; B65H41/00. US patent 8752463B2. Marcel Buerge.

8. Knysh O. B. (2014). Doslidzhennia transformatsii kuta zahostrennia dyskovoho nozha pry obrobtsi korintsia knyzhkovoho bloka perekhresnym sposobom [The transformation research of the angle of the knife blade sharpening of a disk knife during spine processing of a book block by a cross-cutting method]. *Tekhnolohichni kompleksy – Technological Complexes*, *1*, 154-159.

9. Ivanko A. I. (2003). Kinematyka protsesu obrizuvannia knyzhkovoho bloka dyskovymy nozhamy z planetarnym pryvodom [Kinematics of book block cutting by disk knives with planetary gearset in drive]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Technology and Technique of Typography, 2*, 78-81.

10. Knysh O. B. (2021). Doslidzhennia kinematyky bezzupynnoho rizannia knyzhkovykh blokiv dyskovymy nozhamy z planetarnym pryvodom [The kinematics research of continuous book block cutting by disc knives with planetary gearset in drive]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and Publishing, 1*, 62-71.

11. Knysh, O., Rehei, I., & Behen, P. (2020). Doslidzhennia inertsiinykh navantazhen prystroiu obrobky korintsiv knyzhkovykh blokiv u mashyni nezshyvnoho skriplennia [Research of inertial loads in the device for book block spine processing in the perfect binding machine]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Technology and Technique of Typography, 4*, 42-52.

12. O. Knysh, I. Rehei, N. Kandiak & S. Ternytskyi (2019). Experimental evaluation of the tractive effort of the chain conveyor during book block spine processing by cylindrical milling cutter at perfect binding. *Acta mechanica et automatica*. Vol.13 № 2 P. 101-106. DOI: 10.2478/ama-2019-0014.

13. Knysh O. B., Behen P. I., Bilozor Yu. Yu., & Bilyk O. A. (2025). Doslidzhennia kinematyky rukhu tsylindrychnoi frezy pry obrobtsi knyzhkovykh blokiv u mashynakh nezshyvnoho skriplennia [Investigation of the kinematics of cylindrical milling cutter motion in the processing of book blocks in perfect binding machines]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, *2*, 9-19. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-9-19.

14. Poliudov O. M. (2005). *Mekhanika polihrafichnykh i pakuvalnykh mashyn [Mechanics of printing and packaging machines]*. UAD.

15. Topolnytskyi P. V., Knysh O. B., & Kolomiiets A. B. (2023). *Suchasni tekhnolohii obrizuvannia knyzhkovo-zhurnalnykh blokiv [Modern technologies for trimming book and magazine blocks]*. UAD.

Отримано 27.08.2025

UDC 686.12.056

Oleh Knysh[1], Yurij Bilozor[2]

[1]Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department
of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: Oleh.B.Knysh@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5854-1879. **Scopus Author ID:** 57209411556

[2]Graduate Student of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: yurijbilozor05@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-8660-499X

PARAMETRIC RESEARCH OF THE KINEMATICS OF SPINE PROCESSING OF BOOK BLOCKS BY A CYLINDRICAL MILLING CUTTER WITH A PASSIVE DRIVE IN PERFECT BINDING MACHINES

Book block spine processing is a critical stage in the technological process of perfect binding, as it largely determines key performance indicators of the finished publication, including strength, durability, and opening ability. The improvement of spine processing technologies prior to glue application represents an important scientific and practical task, particularly relevant for the production of textbooks and educational literature, where frequent changes in curricula necessitate flexible and efficient manufacturing processes.

One promising approach to enhancing spine processing is the use of a cylindrical milling cutter with a passive drive and additional axial displacement. In this configuration, the milling cutter receives rotational motion through rolling contact with the moving book block, while axial displacement is provided by a fixed end cam and a roller mechanism.

To evaluate the effectiveness of this technological solution, parametric research of the kinematics of the cutting process were conducted. The analysis demonstrated that existing studies on disk instruments and flat knives cannot be fully applied to cylindrical milling cutters, as their cutting kinematics differ significantly.

The methodology for calculating cutting speed and kinematic cutting angles was developed. The research considered three laws of periodic motion for the milling cutter's axial displacement: "sine wave", "cosine wave", and a "5th-degree polynomial ($\alpha = -5$, $\delta = -0.23$)". The results established that the law of periodic motion of the cam mechanism exerts a decisive influence on the kinematic parameters of spine processing. Based on the findings, the "5th-degree polynomial ($\alpha = -5$, $\delta = -0.23$)" was recommended as the most effective for ensuring stable cutting kinematics and high-quality spine processing.

Keywords: *cylindrical milling cutter; spine processing; passive drive; book block; cutting speed; cutting angle; end cam; law of periodic motion.*

Fig.: 6. References: 15.

Книш О. Б., Білозор Ю. Ю. Параметричні дослідження кінематики обробки книжкових блоків циліндричною фрезою з пасивним приводом у машинах незшивного скріплення. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 30-39. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-30-39.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-40-45
UDC 621.8

Marek Sukop[1], Rastislav Jurko[2]

[1]Professor, Professor of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)
E-mail: marek.sukop@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7987-3557
ResearcherID: AAH-5495-2019. **Scopus Author ID:** 36615762200

[2]Engineering student of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)
E-mail: rastislav.jurko@student.tuke.sk

IMPLEMENTING COMPUTER VISION FOR A MOBILE ROBOT

This article focuses on the creation of a sample application that demonstrates the use of computer vision in mobile robotics. This was accomplished using a Raspberry Pi and four types of tags. The goal was to prove that it's possible to create a relatively simple and low-cost image processing solution that's applicable for use in mobile robotics. The article describes the algorithms used as well as the implementation process on the hardware. In conclusion, the article outlines the results achieved and provides recommendations for further research.

Keywords: *mobile robot; image processing; cascade; Raspberry Pi.*
Fig.: 5. References: 7.

Relevance of the research. Nowadays, at every step we encounter the requirement of controlling the movement of mobile robots based on the recognition of its surroundings. There is a requirement that the robot can recognize where it is in space at any time and also how the obstacles in its surroundings are arranged. At the same time, there is a requirement for the lowest possible price of the hardware part of the robot. That is why it is necessary to optimize and implement relatively complex algorithms into relatively cheap hardware platforms. A critical requirement is then the real-time response after image processing, which needs to be addressed.

Problem statement. Real-time image processing on low-cost platforms is a challenge. Since the image is mostly in a two-dimensional field (monochromatic), image processing algorithms are forced to "run" through this field several times, which is computationally demanding. Therefore, it is necessary to optimize and test simplified image processing algorithms and thereby increase the speed of image processing despite reduced reliability.

Analysis of recent research and publications. Artificial intelligence is the ability of technological devices to perform tasks like human abilities, such as reasoning, creativity, planning, and learning. Artificial intelligence systems can operate autonomously and adapt their behaviour based on previous steps. Thanks to artificial intelligence, technical systems can distinguish the surrounding environment and solve identified problems to achieve a specific goal. To do this, a computer obtains data from various sensors, such as cameras, which are then processed and interpreted. Image and video processing plays a significant role in the field of artificial intelligence [2]. The main goal of the work was to prepare computer vision and self-object detection to a functional phase suitable for demonstration, so that the subsequent implementation of the entire solution into a mobile robot remains just a detail.

Uninvestigated parts of a common problem. In addition to research goals, the motivation for creating an image processing application on the Raspberry Pi was also for educational purposes. During the educational process, it is appropriate to show students how some image processing algorithms work. It is also appropriate to show them a platform other than a PC and the performance of algorithms running on a given platform. Also, the implementation of algorithms on different platforms may differ. When testing the proposed application, students can also edit and change the photos used in the cascade and thus test and verify the stability of the recognition algorithms.

© M. Sukop, R. Jurko, 2025

Research objective. The aim of the article was to run an optimized image recognition algorithm (cascade classifier) for the recognition of four different images. Of course, the result is not optimal, since the algorithm needs more samples. However, according to the computational complexity, it was not, and therefore the proposed algorithm was implemented with such a few trained images that it was not too convenient to delay the evaluation.

The statement of basic materials. The Raspberry Pi is a platform that, thanks to its flexibility and low cost, has become popular not only among teachers, students, and tech enthusiasts but also among developers and even industrial companies [3]. Users can create their own applications and programs using various programming languages, such as Python, Java, C++, and others. Of course, there are also many open-source projects available online that enable and help users more easily create their own projects and programs. This platform is ideal for development projects and IoT applications, such as smart homes, temperature and humidity measurement, process automation, creating your own gaming consoles, or, as in the case of this thesis, reading road signs using computer vision and evaluating the results. Overall, it can be said that the Raspberry Pi is a great tool for development and experimentation, giving users the ability to create their own projects and solve various problems using technology [1].

The first boot of a Raspberry Pi is completely different from other computers or mobile phones. To function, the Raspberry Pi uses an operating system called Raspbian, which first needs to be installed on an SD card that is then inserted into the hardware. Therefore, in addition to the Raspberry Pi microcomputer itself, we will also need a helper computer with a Windows or macOS operating system, which is only used for the initial installation, and an SD card. If a user is familiar with the Linux OS, they will also enjoy Raspbian, as the Raspbian OS is based on this platform. It is available in two versions: Lite and Pixel. The Lite version contains only the basic components of the operating system and is controlled via a terminal window, i.e., a text command line. This version is suitable as a small Linux server or for use without a monitor, for example, to control logic in home automation and the like. The Pixel version includes a graphical user interface (GUI), the tkinter library, and many pre-installed applications [4].

To solve the control and, more importantly, to utilize computer vision, a few key steps must be completed:

Installation of the libraries (OpenCV), connecting the display and camera to the board,

Creating your own database to detect only the objects you need.

The OpenCV library was invented by Gary Bradsky in 1999. It is based on optimized C/C++ code and supports Java and Python. OpenCV has more than 2,500 optimized algorithms, including an extensive collection of computer vision and machine learning algorithms. With it, it is easier to perform tasks that may seem complex at first glance, such as face identification and recognition, object identification, classifying human actions in videos, tracking moving objects, extracting 3D models of objects, and much more [5].

To create our own cascades, we used the Cascade Trainer GUI application [6] for this thesis. When creating a custom cascade with this application, it's crucial to prepare your materials in advance. The first necessary step is to create a file containing two folders. The folder names must be n and p. The content of these folders is essential for the detection to work correctly. In the n folder, we place negative images–images we don't want to be detected. In our case, these are houses, cars, trees, and roads (Fig. 1).



Fig. 1. Image file for negative detection [1]

The images placed in the folder named p are illustrative examples of STOP signs from various angles, with different brightness values, and in some cases, we also used filters and rotation (Fig. 2). The rule is that the more comparison images the file contains, the more accurate, faster, more efficient, and more reliable the detection will be. The typical number of images needed for the software to detect an object is in the hundreds to thousands. As you can see in the following image, we used 32 images in our case. For simple detection, this number is sufficient, but it is not 100 % successful. Also, when working with a camera, external light always plays a crucial role, as it drastically affects computer vision.



Fig. 2. Image file for possitive detection [1]

A crucial detail when saving images for detection is their format. They must all have the same resolution and aspect ratio. If this is not followed, the application will display an unidentifiable error. In our case, we chose an aspect ratio of 1:1 and a resolution of 800x800 for all images.



Fig. 3. Tags ready for detection [1]

The entire procedure explained in this chapter was repeated four times, as the goal of this thesis is to detect and create custom cascades for multiple road signs. In our case, these were the road signs for “STOP”, “Yield”, “Speed limit 30 km/h”, and “End of speed limit” (Fig. 3).

The program, written in Python for this specific application, has 162 lines. The programming was done continuously, and we progressively fine-tuned the details until we had a functional program code. Flowchart diagram of the main part of the written code is on the Fig. 4.

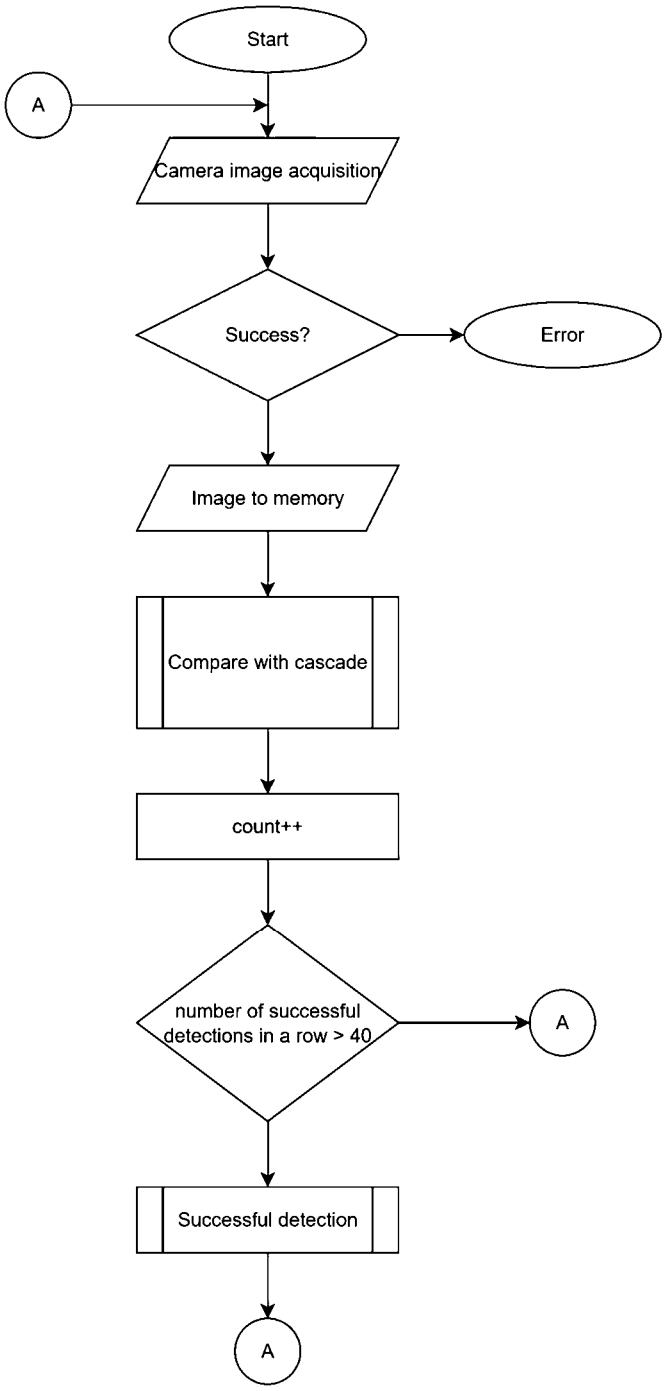


Fig. 4. Flowchart diagram of the main part of the code

In Fig. 5, all four detected tags are shown. The images also show the subsequent reaction, meaning that if a speed limit sign is detected, the robot will brake (the rear brake lights can be seen) etc.

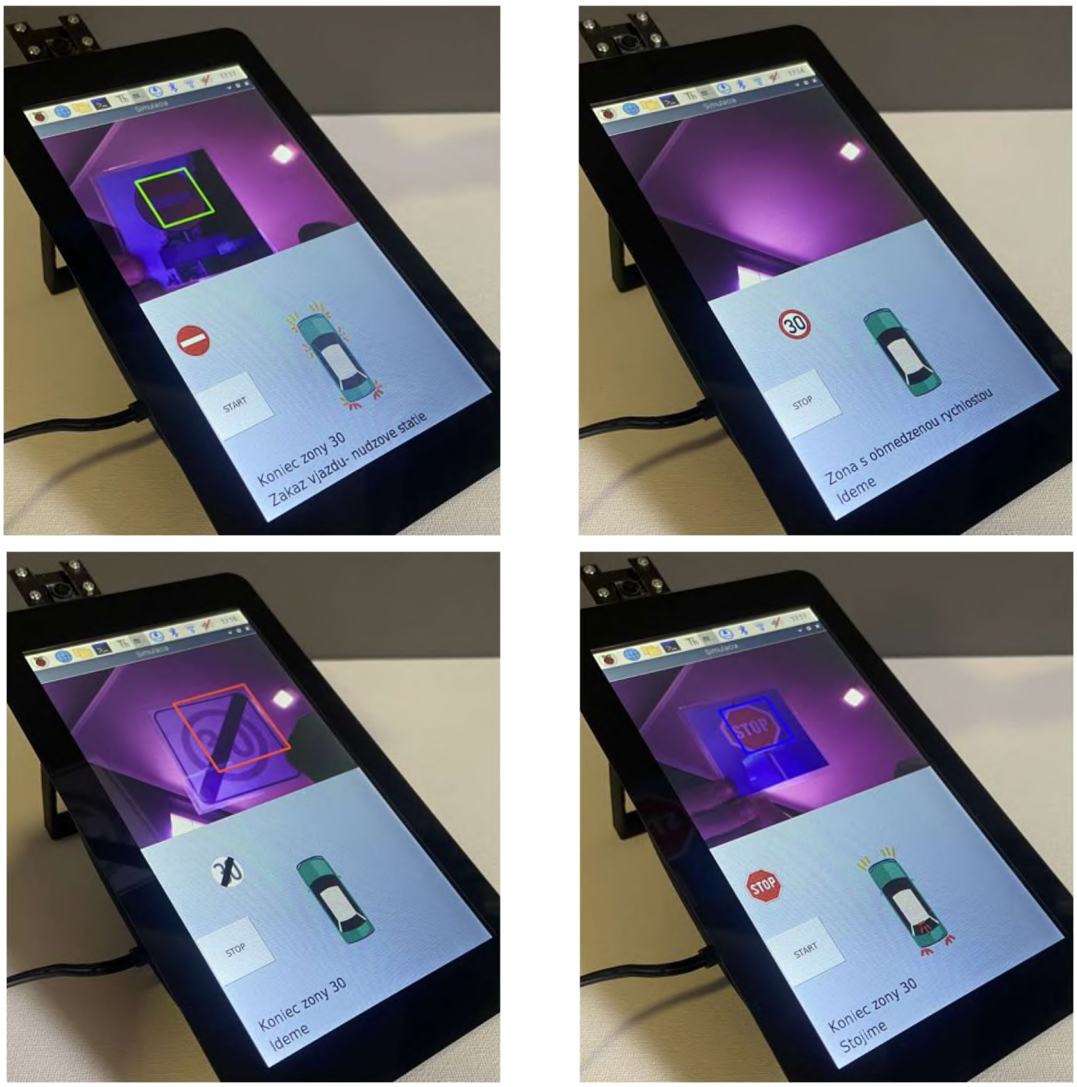


Fig. 5. Tags detection and application reaction

Conclusions. The main goal of the article, which was to detect custom objects, was successfully achieved, and its functionality was proven with the application that was created. The next objective, which was beyond the scope of this thesis but would be a future requirement, is to install this program into a service robot, create control using UART communication, receive and send signals via GPIO pins, and build a functional service robot model.

When creating a custom database, various problems can arise, such as a lack of sample images, incorrectly set resolution, and an unsuitable aspect ratio. To create a proper cascade database, you need to follow certain rules. Within the cascade creation application, it's necessary to set the constants appropriately so that the creation process isn't overly time-consuming and inefficient. This thesis shows the exact procedure that proved to be the best alternative after long processes of testing and fine-tuning.

The practical part also includes an introduction to the application, its appearance after switching it on, and its functioning, so that the reader can form their own opinion about what is behind the creation of such a functional result.

Acknowledgements

This article was created thanks to the VEGA project support: 1/0294/24 Research and development of multi-robotic system with distributed intelligence in the cloud.

References

1. Jurko, R: (2023), Implementácia počítačového videnia do riadenia mobilného robota. Technická Univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Diploma work, 2023.

2. EuroparlTV. (2020, August 27). Artificial Intelligence: Definition and Use. European Parliament [cit.2023-01-04]. Dostupné na internete: https://www.europarl.europa.eu/news/sk/headlines/society/20200827STO85804/ umela-inteligencia-definicia-a-vyuzitie?at_campaign=20234-Digital&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Artificial_Intelligence&gclid=CjwKCAjwl6OiBhA2EiwAuUwWZVi_CbL5gJipMIZ0sk5FYe-7qRc86VevFwpg07T7j-nZfwICONLPOhoCm2wQAvD_BwE.

3. Raspberry Pi. (2023). *Raspberry Pi Software* [Computer software]. Retrieved January 10, 2023, from https://www.raspberrypi.com/software.

4. Gendzo. (2018): Inštalácia a prvé spustenie Raspberry Pi. [online], [cit.2023-02-06]. Dostupné na internete: https://www.gendzo.sk/navody/instalacia-a-prve-spustenie-raspberry-pi/ [28. apríla 2023].

5. MyGreatLearning. (2022). OpenCV tutorial in Python. [online]. Dostupné na internete: https://www.mygreatlearning.com/blog/opencv-tutorial-in-python/.

6. AHMADI, A.: Cascade Trainer GUI. [online]. Dostupné na internete: https://amin-ahmadi.com/cascade-trainer-gui/

7. Hajduk, M., Sukop, M., & Haun, M. (2019). *Cognitive multi-agent systems: Structures, strategies and applications to mobile robotics and robosoccer.* Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93685-7.

Отримано 29.08.2025

УДК 621.8

Марек Сукоп[1], Растислав Юрко[2]

[1]професор, професор кафедри виробничих систем і робототехніки
Технічний університет Кошице (Кошице, Словакія)
E-mail: marek.sukop@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7987-3557
ResearcherID: AAH-5495-2019. **Scopus Author ID:** 36615762200

[2]студент інженерного факультету кафедри виробничих систем і робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словакія)
E-mail: rastislav.jurko@student.tuke.sk

ПЕРЕВІРКА ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

У статті розглядається розробка прикладу докладання, демонструє практичне застосування комп'ютерного зору у сфері мобільної робототехніки. В основі проєкту лежить доступна та економічна апаратна платформа, що складається з Raspberry Pi, зовнішньої камери та сенсорного дисплея. Основна функція програми – розпізнавання та обробка чотирьох різних типів дорожніх знаків. Основною метою було довести можливість створення щодо простого та недорогого рішення для обробки зображень, що безпосередньо застосовується до проєктів мобільної робототехніки. Важливою мотивацією даної роботи стало створення педагогічного стенда, призначеного для тестування та вивчення подібних алгоритмів. Цей стенд є базовим освітнім інструментом, надаючи студентам практичну платформу для розуміння фундаментальних принципів обробки зображень та базових алгоритмів штучного інтелекту. Отриманий додаток і методологія, що лежить в його основі, будуть використовуватися для того, щоб допомогти студентам освоїти ці складні теми в практичному, реальному контексті. У статті докладно описані алгоритми та покроковий процес їх реалізації на апаратному рівні. У статті коротко описаний алгоритм розпізнавання дорожніх знаків, наочно проілюстрований блок-схемою для кращого розуміння. Програмне забезпечення розроблене на Python для платформ Raspberry Pi з використанням потужних бібліотек, таких як Numpy і OpenCV, які необхідні для виконання точних обчислень і широкого спектра завдань обробки зображень. Крім того, у статті описується процес створення бази даних зображень та їх підготовки, які використовуються як позитивні або негативні збіги для алгоритму розпізнавання. У разі позитивних збігів додаток навчався розпізнавати конкретні знаки, включаючи знак «Стоп», знак «В'їзд заборонений», знак «Максимальна швидкість 30 км/год» та знак «Кінець обмеження швидкості». У заключних розділах статті обговорюються досягнуті результати, підтверджується успішність проєкту в досягненні початкових цілей та пропонуються цінні рекомендації для майбутніх досліджень, спрямованих на розширення поточної роботи. Зокрема, пропонуються заходи щодо підвищення продуктивності алгоритму та розширення різноманітності розпізнаваних системою об'єктів.

Ключові слова: *мобільний робот; обробка зображень; каскад; Raspberry Pi.*
Рис.: 5. Бібл.: 7.

Sukop M., Jurko R. (2025) Implementing computer vision for a mobile robot. *Technical sciences and technologies,* (3(41)), 40-45. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-40-45.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-46-53
UDC (07)621.7:621.8

Peter Tuleja

Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)
E-mail: peter.tuleja@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6390-3109. **Scopus Author ID:** 55570858300

WORKPLACE FOR MEASURING COMPRESSED AIR CONSUMPTION IN LABORATORY CONDITIONS

Compressed air consumption in industry is increasing. It is necessary to be able to determine its value during operation. These data can reveal malfunctions in the compressed air distribution. The article presents the implementation of the measuring station in laboratory conditions, the aim of which was to create a functional solution that allows accurate measurement of compressed air consumption during operation. The Aventics AF2 flow meter operating on the thermal principle with the possibility of communication using OPC UA was used. The system was integrated into the equipment of the pneumatic laboratory and the measured values were processed in the MATLAB. This tool allows you to monitor the change in selected quantities in real time. It allows you to save them as MS Excel files or as graphic outputs. Verification of the system's functionality was carried out by a series of measurements. The results confirmed the suitability of the selected technical solution. The article is an overview and informational.

Keywords: *compressed air; consumption; measuring device; architecture of the measurement chain; the communication protocol. Fig.: 6. Table: 1. References: 10.*

Relevance of the research. At the time when the issue of energy savings and related environmental pollution with exhalates arising during energy production is becoming more and more relevant, the issue of saving all energy, the production of which is linked to the consumption of fossil fuels in particular, is coming to the fore [1]. These types of energy undoubtedly include electricity, which consumption also significantly burdens the carbon footprint associated with the production of compressed air [1].

Companies using compressed air (practically all automated operations) today monitor compressed air consumption very strictly.

Until recently, compressed air consumption in operations was considered a marginal problem and users paid almost no attention to it. This was not only due to the fact that existing compressed air leaks were overlooked, but also to the absence of existing technical means that provide a picture of the economic use of compressed air energy.

Problem statement. Often, suspected compressed air leaks were detected only by a trivial procedure, where the operator of the compressor stopped the operation of individual workplaces in operation to monitor whether the compressor activity still occurred. Although this procedure confirms the losses, it does not provide information about their size and therefore does not allow a decision on their elimination method.

The aim of the project we implemented was to find a suitable methodology for collecting editable data on the level of compressed air consumption in laboratory conditions using available technical means [2].

Analysis of recent research and publications. Companies producing a range of pneumatic components are coming up with ever newer and more advanced elements that serve to monitor and collect data related to total or current compressed air consumption [3-6]. Using comparative virtual models of operation, it is possible to effectively and accurately eliminate the detected losses. This is done by special audits offered by these companies, which are designed to determine the real value of the required volume of compressed air per unit of time based on the detection of actual information about the customer's operation and, by examining other parameters of operation, to determine areas in which there are reserves [7; 8].

However, in these audits it is imperative that the customer provides the auditor with truthful data, which in many cases is not entirely self-evident.

© P. Tuleja, 2025

The problems associated with this lie mainly in inaccurately interpreted documentation of the realized first-run system or the use of components that do not exist in the project. Most often, these are the values of the lengths of the hoses used (sometimes also their cross-sections).

Isolation of previously unexplored parts of the general problem. In the implemented project, we did not deal with the simulation of the evaluated process, despite the fact that the system processes data in an environment that allows it. For our purposes, it was sufficient in this step of the solution to create a functioning system that would allow the collection of editable data, with which, after completing the measurement workplace and only after creating a virtual environment for modeling the course of the measured process, these two systems could be connected. Simulation already represented an issue beyond the scope of the assignment of the diploma thesis project. However, it is not excluded that in the given project this deficiency was eliminated, e.g. by announcing a new diploma thesis assignment focused on this problem.

Research objectives. When solving the task of collecting defined data while monitoring the ongoing operation of a pneumatic system, the goal was to achieve a usable system that would allow for the recording and display of measured data at a certain speed according to the operator's specifications. The output was to be tabulated measured values of selected parameters, with which it would be possible to work and analyze them further.

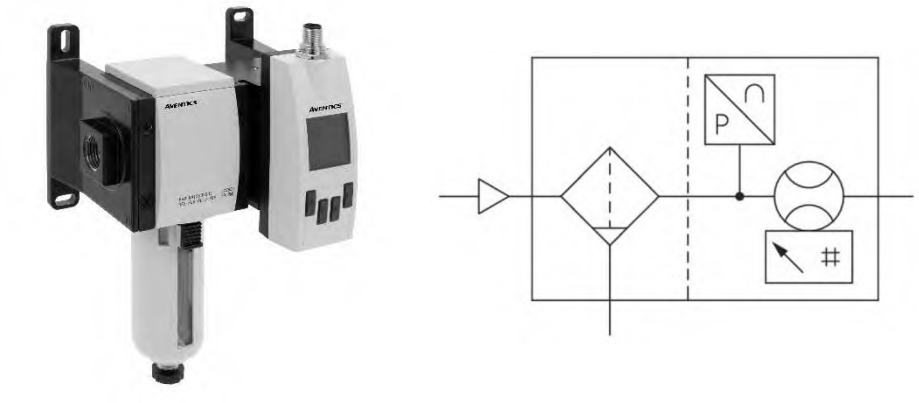
Based on the successfully implemented data transfer architecture, it was necessary to perform verification measurements. For these purposes, laboratory-used circuits with compressed air were used [2].

In the future, it is expected to use this system in the design of new drive units for the International EMERSON Aventics Pneumobile Competition project [9].

Measuring system for determining compressed air consumption. The project was created based on the need to verify some parameters related to the real consumption of compressed air for the needs of the educational process at the department as well as for the needs of finding relevant data for the aforementioned project of constructing an economical pop-up unit for the EMERSON Aventics Pneumobile Competition project [9].

In the form of a diploma project, a methodological procedure was proposed for determining the actual value of the volume of flowing compressed air as either an instantaneous value, an average value or its graphic course by using a suitable flow meter.

An industrial compressed air flow meter AF2 from EMERSON (Aventics) [3] was used for the project, Fig. 1, *a*).



a *b*

Fig. 1. Flow rate sensor AVENTICS AF2 (R412026837)

Source: [3].

This device provides the ability to measure the value of the normal flow rate Qn in the range from 5 l/min to 1590 l/min.

It is installed at one of the workplaces in the Laboratory of Pneumatic Systems, which serves to train our students in the compressed air use. On the pneumatic diagram of the part of the workplace with the internal designation ST01, Fig. 2, it is marked as 02.

As can be seen from its schematic symbol, Fig. 1b), it is a combination of a measuring device and an air treatment unit consisting of a filter and a condensate separator.

The most important parameters are listed in Table 1.

Table 1 – Parameters of flow rate sensor AVENTICS AF2 (R412026837)

Flow measuring principle	calorimetric
Minimal flow	5 l/min
Nominal flow	1060 l/min
Maximal flow	1590 l/min
Min. working pressure	0 MPa
Max. working pressure	1.6 MPa
Min. ambient temperature	-20 °C
Max. ambient temperature	60 °C
Min. medium temperature	-20 °C
Max. medium temperature	60 °C
Medium	Compressed air Argon Nitrogen Carbon dioxide
Output signal	OPC UA MQTT Integrated WEB server

Source [3].

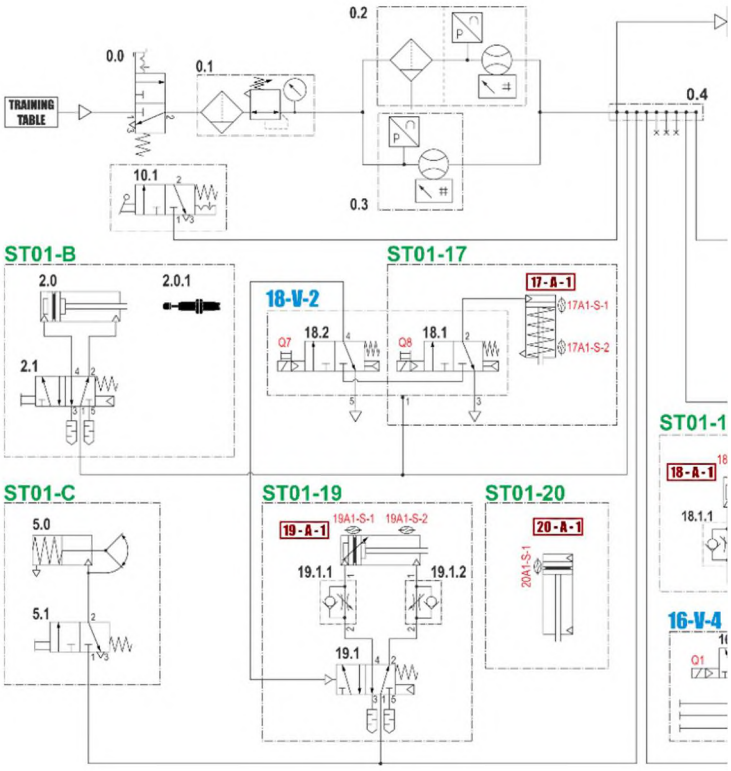


Fig. 2. Part of a pneumatic circuit with an integrated flow meter

Source: compiled by the author.

Since this is a device that can communicate via the RJ-45 interface within the Ethernet network connection of the workplaces in the laboratory, it was necessary to solve the value of the voltage level that the device requires.

While the high-frequency signal does not exceed 3V during Ethernet transmission, our device needs a supply voltage of 36 V DC transmitted via the RJ-45 interface. Therefore, it was necessary to include a PoE Injector in the network, which mediates the required voltage.

The architecture of the arrangement is shown in Fig. 3.

The implementation of the connection according to Fig. 3 already allows data transfer via the WEB server application, Fig. 4, however, the data provided by this application are not sufficiently interperable (they can only be preserved by the PrtScr - printscreen service of the computer operating system), and the data transfer has a significant delay.

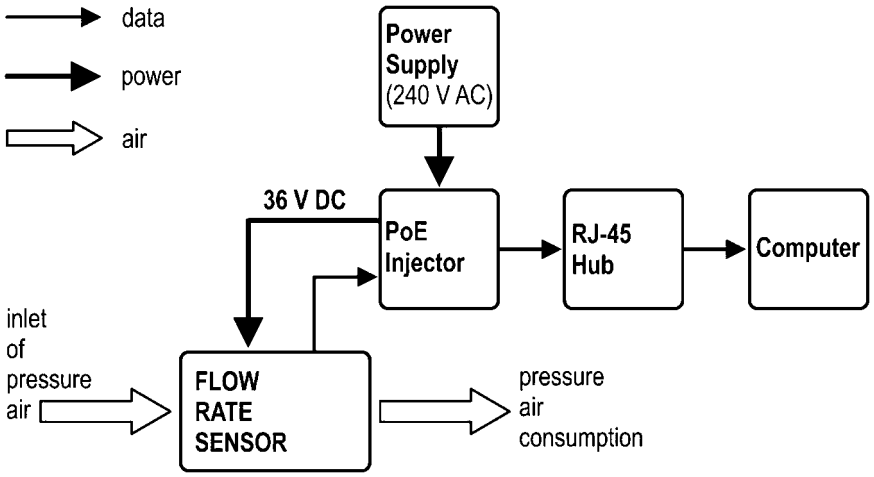


Fig. 3. Flowmeter connection architecture

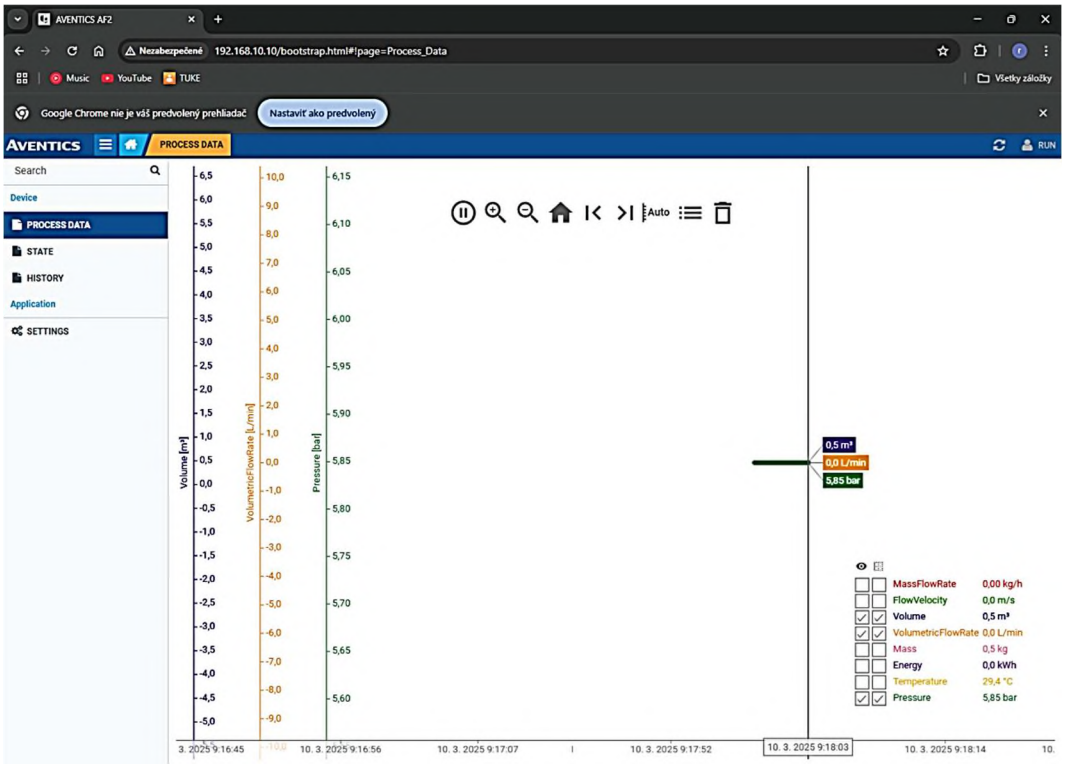


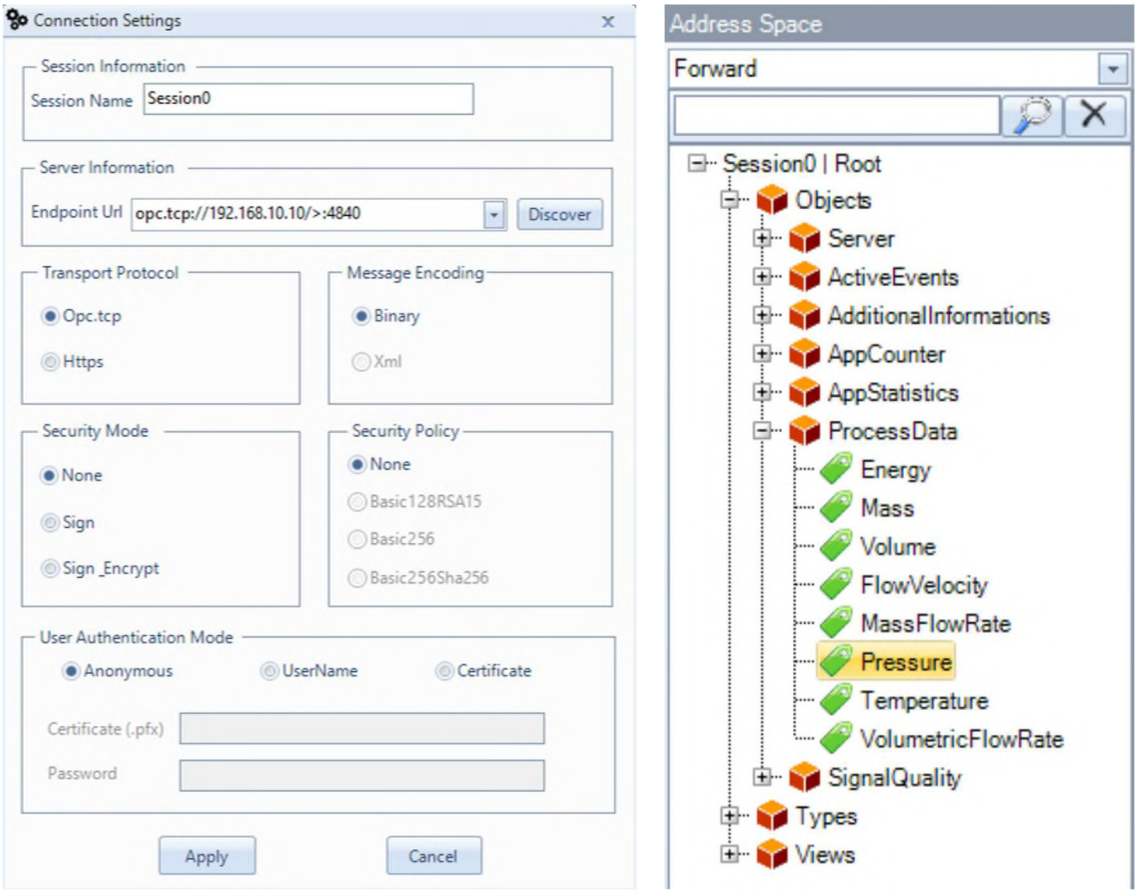
Fig. 4. Environment provided by WEB server service [2]

Since our intention was to obtain a set of editable data with which it is possible to work further and perform the necessary analyses, we decided to use the OPC UA (Open Platform Communications – Unified Architecture) service provided by the device, i.e. an open, independent communication standard for industrial automation. It enables secure and reliable data exchange between machines, systems and the cloud within Industry 4.0.

This protocol is platform-independent and service-oriented. At the same time, it has robust security features. The protocol serves as a "universal translator" for various devices, thus ensuring interoperability and effective communication.

The OPC UA implementation provides access to the operational data of the device – the flow meter. In this case, the server is the data source and manages the data model, while the client connects to this server to read or write live data, browse the data structure.

By setting the IP address and port on the PC, Fig. 5, *a*, the client has access to all necessary data, arranged in a clear tree structure, Fig. 5, *b*.



a *b*

Fig. 5. Setting the IP address and port (a) and displaying the flowmeter variables (b)
Source [2].

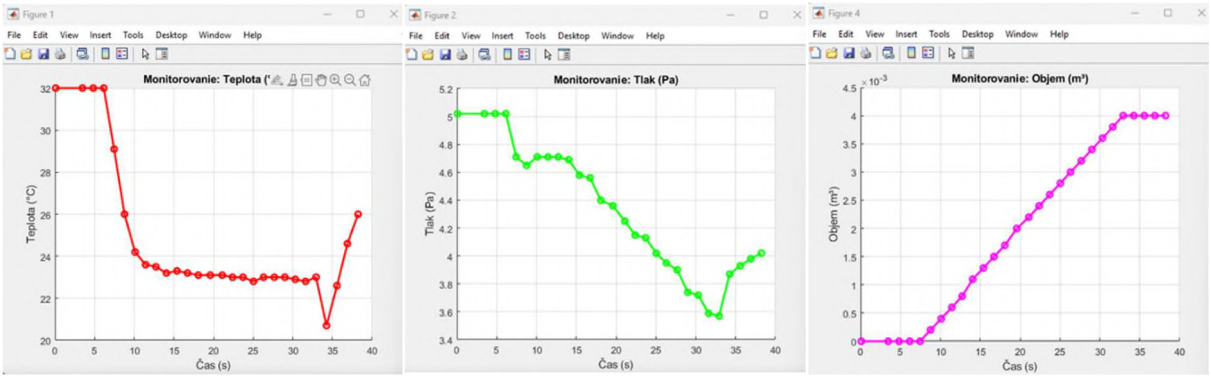
For data flow processing, a monitoring system was developed using the MATLAB computing environment.

This created a real tool for real-time data visualization. This created a prerequisite for the possibility of implementing a real model of expected consumption (theoretical consumption) and comparing it with data measured in real time.

The model and the entire system were tested in conjunction with existing workplace equipment, while monitoring the plausibility of measured data with mathematically calculated values.

The pneumatic cylinder DSNU-25-160-PPV-A (manufacturer FESTO) operating in a cycle, on the pneumatic diagram, Fig. 2, marked as 19-A-1, controlled by an air-operated valve marked 19.1 (monostable air-operated 5/2 valve), for which the control air signal is generated from the PLC via a 3/2 N.C. valve marked 18.2 (part of a double valve 2x3/2 N. C., manufacturer AVENTICS/EMERSON).

The values of the measured selected parameters as displayed by the system are shown in Fig. 6.



Temperature *Pressure* *Volume*

Fig. 6. Graphical outputs provided by the measurement system

Source [2].

The data shown in the graphs is also stored as numerical data in MS Excel.

The model is primarily intended for educational purposes, such as demonstrating the importance of measuring compressed air consumption data when operating automated devices powered by compressed air. However, it can also be used to take measurements at the customer's premises.

Conclusions. Teaching our students to properly connect a pneumatic circuit or draw a wiring diagram is certainly a necessary thing, since the use of compressed air in automated operations is not slowing down, but the added value should be information about the behavior of a particular pneumatic component with regard to its financial burden (acquisition costs) but also the burden associated with its use (operating costs). And, this is exactly the area where it is very easy to save. Someone wise said that you can only save on what you do not have to produce. This is doubly true when it comes to compressed air consumption.

Acknowledgements

This research was supported by project VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

References

1. Tuleja P. Reducing the carbon footprint in the use of compressed air in automation. In: Technical Sciences and Technologies. – Chernihiv (Ukrajine): Chernihiv National University of Technology. Vol. 37, No. 3 (2024), s. 58-63. – ISSN 2411-5363.

2. Džima Radovan, Tuleja Peter Automatizované meracie pracovisko pre stanovenie veľkosti spotreby vzduchu pneumatických komponentov v laboratórnych podmienkach (Automated measuring workplace for determining the air consumption of pneumatic components in laboratory conditions). Diploma thesis. In Slovak. TU in Košice, 2025. 63 p.

3. AVENTICS Series AF2 Flow Sensors [online]. Available on: https://www.emerson.com/nl-be/catalog/aventics-af2.

4. SMC PF2A7 – PF2A7**, Digital Flow Switch for Air, Integrated Display Type [online]. Available on: https://www.smc.eu/en-gb/products/pf2a7-digital-flow-switch-for-air-integrated-display-type~50678~cfg.

5. ABB VortexMaster FSV450: Vortex flowmeter [online]. Available on: https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/vortex-flowmeters/vortexmaster-fsv450.

6. Testo 6448 – Compressed air meter with bar probe (DN40-250). Available on: https://www.testo.com/en-UK/testo-6448/p/0555-6448.

7. Demeč P., Tuleja P. Energetický audit pneumatického obvodu v automatizovanej prevádzke zameraný na šetrenie stlačeného vzduchu – 2022. In: ATP journal: Priemyselná automatizácia a informatika: odborný mesačník o priemyselnej automatizácii, informatike a robotike. – Bratislava (Slovensko): HMH Roč. 29, č. 5 (2022), s. 38-40 [print, online] – ISSN 1335-2237. In Slovak.

8. Tuleja P. Trendy pri šetrení energie stlačeného vzduchu pri uchopovaní podtlakom. In: Transfer inovácií: internetový časopis o inováciách v priemysle. Košice (Slovensko). Technická univerzita v Košiciach. No. 49 (2024), p. 68-71. – ISSN 1337-7094. Available on: https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/49-2024/pdf/068-071.pdf.

9. Tuleja P. Analysis of existing drive unit solutions for the pneumobile project. In: Technical Sciences and Technologies. – Chernihiv (Ukrajine): Chernihiv National University of Technology. Vol. 21, No. 3 (2020), pp. 129-134. ISSN 2411-5363, Available on: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-129-134.

10. Tuleja P., Jánoš, R., Semjon, J. Relations between using compressed air and environmental protection. In: Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky. – Košice (Slovensko): Vol. 7, No. 6 (2019), pp. 98-101 [print] – ISSN 1338-9432.

Список використаних джерел

1. Tuleja, P. (2024). Reducing the carbon footprint in the use of compressed air in automation. *Technical Sciences and Technologies, 37*(3), 58-63. Chernihiv, Ukraine: Chernihiv National University of Technology.

2. Džima, R., & Tuleja, P. (2025). *Automatizované meracie pracovisko pre stanovenie veľkosti spotreby vzduchu pneumatických komponentov v laboratórnych podmienkach* [Automated measuring workplace for determining the air consumption of pneumatic components in laboratory conditions] (Diploma thesis). Technical University in Košice.

3. Emerson. (n.d.). *AVENTICS Series AF2 flow sensors* [Online catalog]. Retrieved October 14, 2025, from https://www.emerson.com/nl-be/catalog/aventics-af2.

4. *Buy PF2A7**, digital flow switch for air, integrated display type online | SMC UK*. (n.d.). SMC Europe | SMC Europe. https://www.smc.eu/en-gb/products/pf2a7-digital-flow-switch-for-air-integrated-display-type~50678~cfg.

5. *Page not found*. (n.d.). ABB Group | Helping industries outrun – leaner and cleaner – ABB Group. https://new.abb.com/products/measurement-products/flow/vortex-flowmeters/vortexmaster-fsv450.

6. Testo SE & Co. KGaA. (n.d.). *Testo 6448 – Compressed air meter with bar probe (DN40–250)* [Product page]. Retrieved October 14, 2025, from https://www.testo.com/en-UK/testo-6448/p/0555-6448.

7. Demeč, P., & Tuleja, P. (2022). Energetický audit pneumatického obvodu v automatizovanej prevádzke zameraný na šetrenie stlačeného vzduchu [Energy audit of a pneumatic circuit in automated operation focused on saving compressed air]. *ATP Journal: Priemyselná automatizácia a informatika*, 29(5), 38-40. HMH. https://www.atpjournal.sk/ (Original work published in Slovak).

8. Tuleja, P. (2024). Trendy pri šetrení energie stlačeného vzduchu pri uchopovaní podtlakom. *Transfer inovácií*, (49), 68-71. Technical University in Košice. https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/49-2024/pdf/068-071.pdf.

9. Tuleja, P. (2020). Analysis of existing drive unit solutions for the pneumobile project. *Technical Sciences and Technologies*, (3(21)), 129-134. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-129-134.

10. Tuleja, P., Jánoš, R., & Semjon, J. (2019). Relations between using compressed air and environmental protection. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky, 7*(6), 98-101.

Отримано 19.09.2025

УДК (07)621.7:621.8

Петер Тулея
доцент, доцент кафедри виробничих систем і робототехніки
Технічний університет Кошице (Кошице, Словакія)
E-mail: peter.tuleja@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6390-3109. **Scopus Author ID:** 55570858300

РОБОЧА СТАНЦІЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ

Споживання стисненого повітря в промисловості, особливо в автоматизованих операціях, має постійно зростаючу тенденцію. Пов'язані з цим експлуатаційні витрати погіршують конкурентоспроможність виробника. Тому для користувача стисненого повітря важливо мати можливість визначати значення кількості повітря, споживаного під час роботи, або його пікові значення. У багатьох випадках це може свідчити про несправність у системі розподілу стисненого повітря (розрив трубопроводу розподілу стисненого повітря).

У статті представлено успішну реалізацію вимірювальної станції, призначеної для визначення кількості спожитого повітря у лабораторних умовах. Метою роботи було створення функціонального рішення, яке дозволило б точно вимірювати споживання стисненого повітря під час роботи пневматичних контурів із можливістю зберігання виміряних показників витрати повітря. Лабораторне обладнання також дозволяє цій системі моделювати несправності пневматичних компонентів, спричинені зносом або пошкодженням.

У рішенні використовувався витратомір Aventics AF2, що працює на тепловому принципі та забезпечує зв'язок за стандартом OPC UA. Це, у поєднанні з мережею Ethernet, створеною в лабораторії, є дуже потужним інструментом для навчальної діяльності в лабораторії.

Вимірювальна система інтегрована в існуючий пневматичний стенд, який служить для навчальних цілей у лабораторії. Перевірка її функціональності була проведена шляхом серії вимірювань конкретних пневматичних пристроїв. Деякі графічні результати також представлені в цій статті.

Результати підтвердили придатність обраного технічного рішення. Вихідні дані вимірюваних значень згодом були оброблені в середовищі MATLAB. Програмний інструмент, побудований таким чином, дозволяє відстежувати зміну вибраних вимірюваних величин у режимі реального часу. Потім він дозволяє зберігати їх у вигляді файлів електронних таблиць MS Excel, з яких також можна створювати графічні результати.

Стаття є оглядовою та містить інформаційний матеріал.

Ключові слова: *стиснене повітря; споживання; вимірювальний пристрій; архітектура вимірювального ланцюга; протокол зв'язку.*

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 10.

Tuleja, P. (2025). Workplace for measuring compressed air consumption in laboratory conditions. *Technical sciences and technologies,* (3(41)), 46-53. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-46-53.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-54-62
УДК 621.798.4

Назар Мирославович Кандяк[1], Юрій Ігорович Остафійчук[2]

[1]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: nazar.m.kandiak@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4720-3935. **SCOPUS ID:** 57209415215

[2]аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)
E-mail: Yurii.I.Ostafiichuk@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0002-3906-0329

ПОКРАЩЕННЯ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИВОДА ШТАНЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА ІЗ КОМБІНОВАНИМ КРИВОШИПНО-ПОВЗУННИМ МЕХАНІЗМОМ

У статті виконано аналіз кінематичних характеристик привода штанцювального преса із комбінованим кривошипно-повзунним механізмом. Виявлено недоліки цього механізму та окреслено можливості поліпшення його кінематичних і динамічних характеристик. Модернізовано механізм привода натискної плити із комбінованим кривошипно-повзунним механізмом застосуванням сервопривода. Розроблено методику коригування руху натискної плити штанцювального преса. Отримано аналітичні залежності для визначення часових інтервалів, необхідних для керування серводвигуном, задля задання приводу змінної швидкості за розрахованими залежностями. Для підтвердження теоретичних викладок здійснено динамічне моделювання модернізованого механізму в системі MSC Visual Nastran Desktop 4D, результати якого засвідчили ефективність розробленої методики коригування руху привода кривошипа.

Ключові слова: *штанцювання; штанцювальний прес; картонна упаковка; кінематична схема; комбінований механізм; привід; закон.*

Рис.: 8. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. У виробництві багатьох товарів значну частку їхніх витрат становить виготовлення паковання. Паковання надає товару привабливого вигляду й одночасно виконує функції транспортної тари. За даними Всесвітньої пакувальної організації, частка картонного паковання становить 37 % і щороку зростає, що пов'язано з екологічністю такого виду паковання, який не забруднює навколишнє середовище.

Виготовлення паковання займає вагому частку та є найбільш витратним етапом виробництва, що включає багато технологічних операцій. Однією з ключових операцій у виготовленні паковання є штанцювання [1], що включає такі технологічні операції, як висікання, бігування, рицювання та інші. Штанцювання є основною операцією при виготовленні паковання і здійснюється на штанцювальних пресах.

Механізм преса є важливою складовою штанцювального обладнання та виконує технологічні операції з виготовлення паковання, від його роботи залежить точність та якість готової продукції. Як механізми привода натискної плити штанцювального преса застосовуються різноманітні розклинювальні механізми, що працюють у важких умовах та зазнають значних технологічних навантажень. Оскільки рухомі елементи пресів мають велику вагу, під час роботи таких механізмів, крім технологічних навантажень, виникають ще й інерційні.

Основні напрями удосконалення штанцювальних пресів полягають у зменшенні інерційних навантажень, а також у забезпеченні рівномірного підйому натискної плити преса. Модернізація механізму привода натискної плити штанцювального преса є актуальною проблемою у виробництві пакувальної продукції, що впливатиме на якість та вартість готової продукції, адже процес штанцювання є завершальною операцією під час виготовлення картонних розгорток.

Постановка проблеми. Механізми штанцювального преса є металоємними, а висока швидкодія їхньої роботи спричиняє значні інерційні навантаження, що спричинено необхідністю подолання значних технологічних навантажень.

© Н. М. Кандяк, Ю. І. Остафійчук, 2025

Одним із методів модернізації таких механізмів можна розглядати коригування руху натискної плити шляхом вибору раціонального закону руху плити. Це підтверджено у праці [2], де для привода преса використовуються кулачкові механізми, що дають змогу задавати закон руху плити штанцювального преса. Проте в такому способі задання руху для перелаштування на новий закон необхідно замінювати кулачки, що неефективно та ускладнює процес обслуговування устаткування. Задля усунення указаних недоліків доцільно застосувати метод покращення кінематичних характеристик коригуванням руху вхідної ланки сервоприводом, який дозволяє покращити кінематичні характеристики практично будь-якого механізму преса. Такий підхід не потребує складної й дорогої модернізації існуючого устаткування, розробки або заміни механізмів, що часто неможливо через конструктивні обмеження. У цьому разі удосконалення відбувається лише шляхом заміни привода або модернізації наявного шляхом додавання датчика зворотного зв'язку та оновлення електроніки для його керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень у галузі приводів штанцювальних пресів [1] засвідчує високу активність у публікаціях різного типу – патентах, статтях та тезах – щодо удосконалення приводів штанцювальних пресів та наявного обладнання. Оскільки під час виготовлення паковання найбільш енергоємним вузлом є механізм штанцювального преса, де зосереджені значні зусилля та маси рухомих елементів, навіть незначні його покращення можуть забезпечити істотну економію коштів при виробництві картонних розгорток.

Покращення кінематичних характеристик шляхом застосування у приводі штанцювального преса комбінованого кривошипного механізму представлено у публікаціях [3-5], де виведено аналітичні залежності для розрахунку цього механізму, завдяки яким визначено шляхи його удосконалення. Водночас у зазначених роботах не розглянуто можливість коригування закону руху привода для покращення кінематичних характеристик механізму.

Запис законів періодичної дії розглянуто у роботі [6], де подано методику розрахунку кулачкового механізму, під час проєктування якого застосовуються різноманітні закони періодичної дії. Запис законів періодичної дії та їх розрахунок здійснюється в інваріантній формі з використанням відповідних модулів.

Експериментальні дослідження привода штанцювального преса з комбінованим кривошипно-повзунним механізмом наведено у статті [7]. На такому устаткуванні не враховано можливості покращення кінематичних і динамічних характеристик шляхом коригування закону руху.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проаналізувавши вищезазначені роботи, присвячені удосконаленню привода штанцювального преса, було виявлено його недоліки та запропоновано можливості модернізації, зокрема покращення кінематичних характеристик. Наприклад, у праці [2] проаналізовано вплив законів руху на кінематичні характеристики преса. У зв'язку з цим пропонується здійснити модернізацію шляхом коригування руху вхідної ланки.

Мета статті. Робота полягає в розробленні методики покращення кінематичних і динамічних характеристик привода штанцювального преса з комбінованим кривошипно-повзунним механізмом шляхом коригування руху кривошипа за допомогою сервопривода та визначенні математичних залежностей для знаходження часових інтервалів керування сервоприводом зі змінною швидкістю за заданим законом руху, що дозволить покращити енергосилові характеристики механізму.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведено розрахункову кінематичну схему механізму привода штанцювального преса з комбінованим кривошипно-повзунним механізмом.

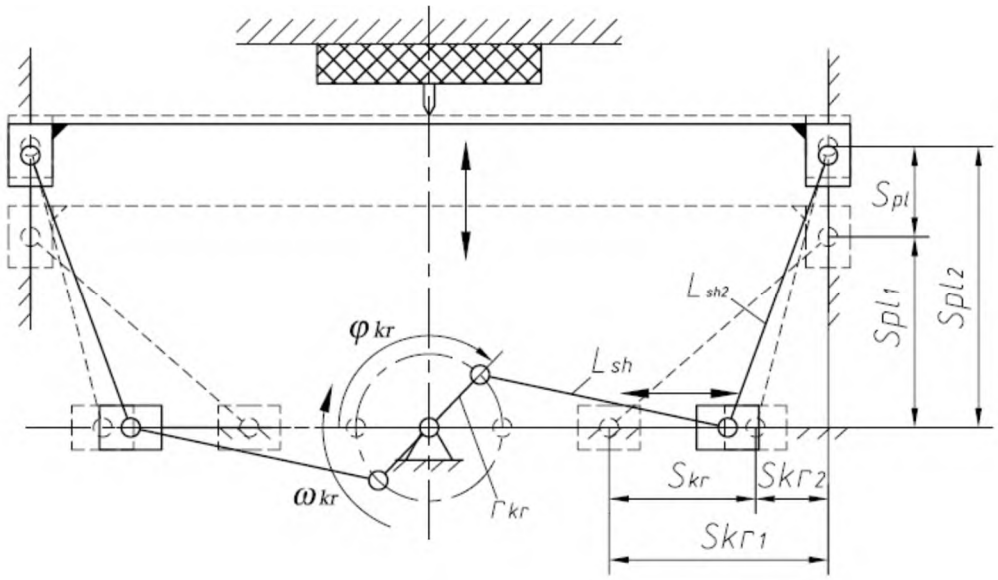


Рис. 1. Розрахункова схема механізму преса

Джерело: розроблено авторами.

На основі геометричних параметрів досліджуваного механізму побудовано графічні залежності переміщення, швидкості та прискорення плити натискного преса (рис. 2) за продуктивності преса 7200 циклів на годину.

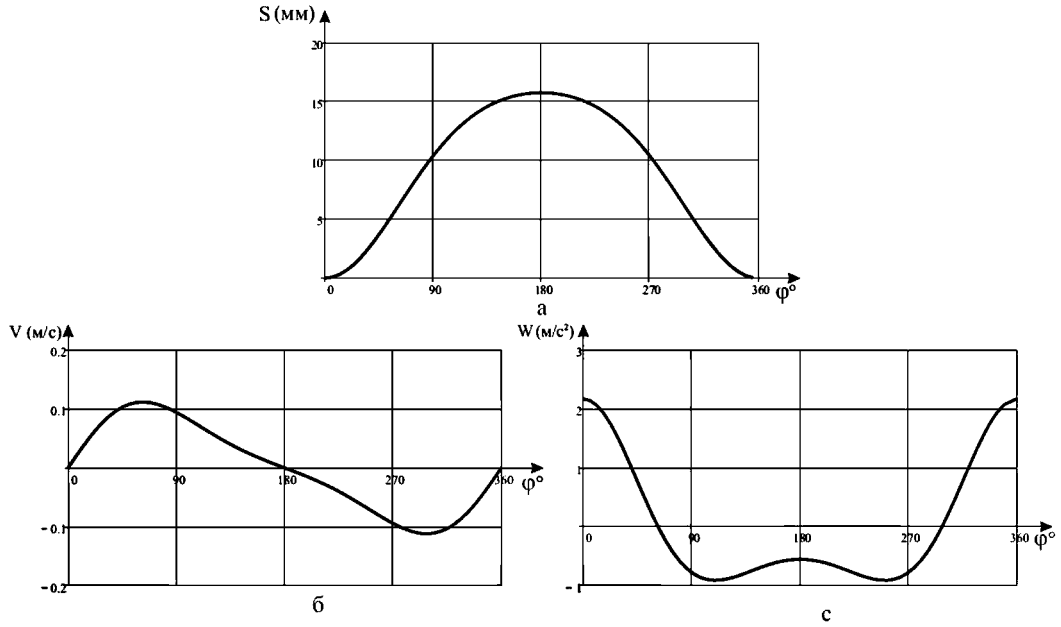


Рис. 2. Графічні залежності вихідного механізма:
а – графік переміщення; б – швидкість; с – прискорення плити штанцювального преса

Джерело: розроблено авторами.

Аналізуючи графічні залежності, особливо графіка прискорення, видно, що в середній ділянці, де відбувається різ картону, спостерігається зміна знаку прискорення, що негативно впливає на роботу механізму. Тому в цій статті для покращення роботи зазначеного механізму пропонується задати закон руху плити та визначити часові інтервали для коригування привода водила, щоб забезпечити необхідний закон руху плити.

Визначення часових інтервалів починаємо із визначення ходу повзуна – це необхідно для того, щоб на цій ділянці задати закон руху плити.

Для визначення ходу повзуна спочатку визначаємо крайні положення повзуна за наступними залежностями.

$$S_{pl1} = \sqrt{L_{sh2}{}^2 - S_{kr1}{}^2}\ ; \tag{1}$$

$$S_{pl2} = \sqrt{L_{sh2}{}^2 - (S_{kr1} - r_{kr} \cdot 2)^2}\ , \tag{2}$$

де S_{kr1} = 80 мм,

r_{kr} = 25 мм,

L_{sh2} = 185 мм згідно з даними експериментального стенда.

Хід повзуна визначається як різниця між його крайніми положеннями.

$$S_{pl} = S_{pl2} - S_{pl1}\ . \tag{3}$$

Оскільки закон руху плити вихідного механізму близький до косинусоїдного, як видно з графіка (рис. 2, *c*), можна рекомендувати коригувати рух вихідної ланки (плити штанцювального преса) відповідно до цього закону.

Для автоматизації розрахунків закон руху плити записується у вигляді поліноміальної функції та в інваріантній формі [6].

Для інваріантів переміщення.

$$a_k = A_2 \cdot k^2 + A_3 \cdot k^3 + A_4 \cdot k^4 + A_5 \cdot k^5 + A_6 \cdot k^6 + A_7 \cdot k^7\ , \tag{3}$$

де A_2 = 2,466;
A_3 = 1,136;
A_4 = -2,67;
A_5 = 1,068;
A_6 = 0;
A_7 = 0; – коефіцієнти полінома для закону руху синусоїда.

Оскільки значення S_{kr1} задано, тоді визначаємо переміщення

$$S_{kr2} = \sqrt{L_{sh2}{}^2 - (S_{pl1} + S_{pl})^2} \tag{4}$$

Перемноживши хід повзуна на інваріант переміщення та підставивши в попередню математичну залежність, отримаємо переміщення першого повзуна за законом руху.

$$S_{kr2i} = \sqrt{L_{sh2}{}^2 - (S_{pl1} + S_{pl} \cdot a_k)^2} \tag{5}$$

Значення швидкості та прискорення першого повзуна знаходимо, відповідно взявши першу та другу похідну від переміщення.

Лінійна швидкість повзуна дорівнює:

$$V_{kr2i} = \frac{dS_{kr2i}}{dt} = \frac{dS_{kr2i}}{d\varphi} \cdot [\omega_{kr}], \tag{6}$$

де ω_{kr} –кутова швидкість кривошипа;

φ – кут повороту кривошипа.

Лінійне прискорення повзуна дорівнює:

$$W_{kr2i} = \frac{d^2 S_{kr2i}}{dt^2} = \frac{d^2 S_{kr2i}}{d\varphi^2} \cdot \left[\omega_{kr}{}^2\right]. \tag{7}$$

Графічні залежності кінематичних характеристик першого повзуна за заданим косинусоїдним законом руху штанцювальної плити представлено на рис. 3.

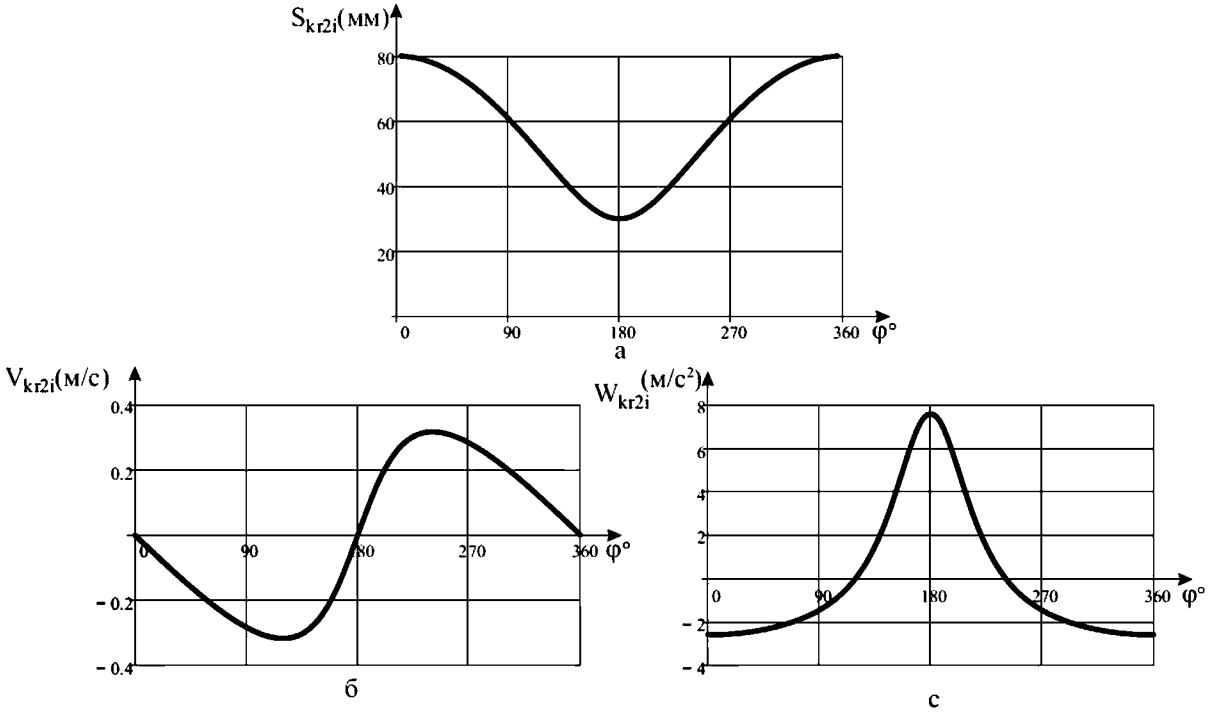


Рис. 3. Графічні залежності переміщення першого повзуна:
а – графік переміщення; б – швидкість; с – прискорення повзуна

Джерело: розроблено авторами.

Коригуючі значення кута повороту кривошипа визначаємо із залежності

$$\varphi_{kr} = \arccos\left(\frac{r_{kr}^{\ 2} + \left(L_{sh} - r_{kr}\right) + \left(S_{kr1} - S_{kr2i}\right) - L_{sh}^{\ 2}}{2\left(\left(L_{sh} - r_{kr}\right) + \left(S_{kr1} - S_{kr2i}\right)\right) \cdot r_{kr}}\right) \tag{8}$$

та виводимо залежності коригуючого кута повороту (рис. 4).

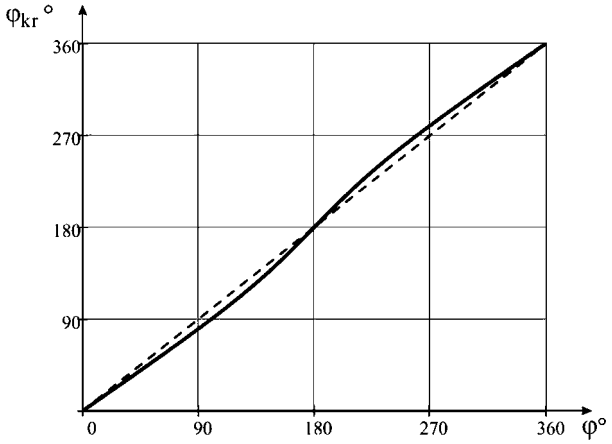


Рис. 4. Графіки залежності кута повороту кривошипа

Джерело: розроблено авторами.

На графіку (рис. 4) штриховою лінією показано кутове переміщення базового механізму, у якому кут повороту кривошипа змінюється з однаковою постійною швидкістю, а суцільна крива відображає необхідне переміщення кривошипа зі змінною швидкістю для забезпечення косинусоїдального закону руху штанцювальної плити.

Взявши похідну від кута повороту кривошипа, отримуємо його кутову швидкість, графік якої наведено на рис. 5. З нього видно, що для забезпечення косинусоїдального руху плити штанцювального преса кривошип має обертатися з кутовою швидкістю, представленою суцільною лінією. Кутова швидкість базового механізму, відображена штрихпунктирною лінією, відрізняється від необхідної лише незначно, що приведе до мінімальних додаткових навантажень на привід.

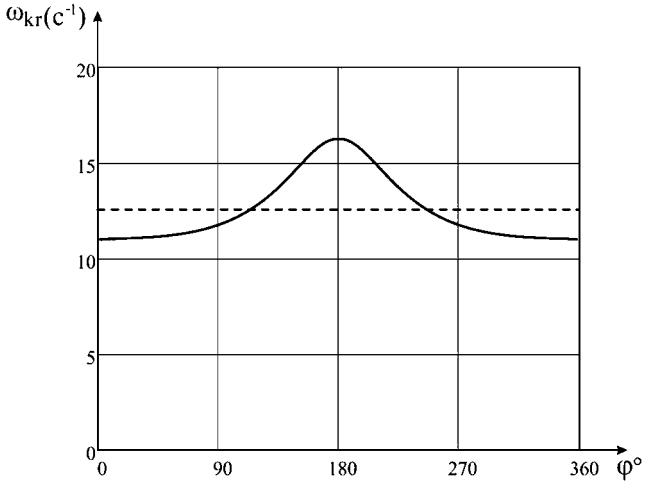


Рис. 5. Графіки кутової швидкості кривошипа

Джерело: розроблено авторами.

Для розрахунку часових інтервалів кутових поворотів кривошипа, необхідних для керування серво- або кроковим двигуном, спочатку визначається період одного циклу механізму в мілісекундах:

$$t = \frac{60 \cdot 1000000}{n}, \tag{9}$$

де n – швидкість обертання кривошипа.

Залежність кута повороту за заданим законом руху має різні інтервали, тому її необхідно записати у вигляді сплайна та виконати інтерполяцію з рівномірними інтервалами кута повороту кривошипа, що здійснено в системі MathCad за допомогою спеціальних функцій interp – здійснює інтерполяцію та lspline – записує у вигляді сплайна.

Відповідно проміжкові значення часових інтервалів набудуть вигляду (рис. 6).

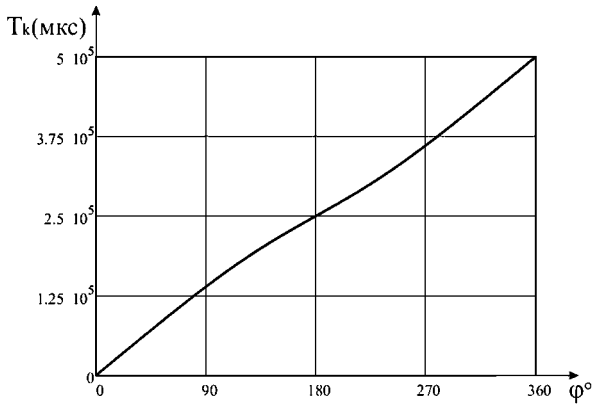


Рис. 6. Графік часових інтервалів

Джерело: розроблено авторами.

Для підтвердження аналітичних розрахунків виконано моделювання руху такого механізму в системі MSC Visual Nastran Desktop 4D. Для цього в системі MathCad були визначені часові інтервали (рис. 6), табличні дані яких було скопійовано та збережено у текстовий файл. Під час урухомлення кривошипа механізму штанцювального преса обрано варіант за графічною залежністю, при якому дані про переміщення зчитуються з попередньо підготовленого текстового файлу (рис. 7).

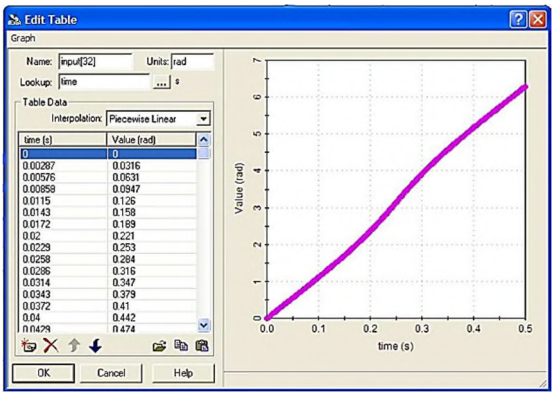


Рис. 7. Завдання закону руху кривошипа в системі MSC. Visual Nastran Desktop 4D
Джерело: розроблено авторами.

Значення переміщення кривошипа, як видно з рис. 7, записані у вигляді таблиці, при цьому обрано метод інтерполяції кусково-лінійною функцією, що забезпечує кращий результат порівняно з іншими методами.

Результат моделювання представлено на рис. 8, де наведено графічні залежності переміщення, швидкості та прискорення плити штанцювального преса. З цих графіків видно, що закон руху плити відповідає косинусоїдальному закону, на відміну від некоригованого руху, зображеного на графіках рис. 2, що призвело до зменшення пікових значень прискорення в 1,74 раза та відповідно інерційних навантажень механізму.

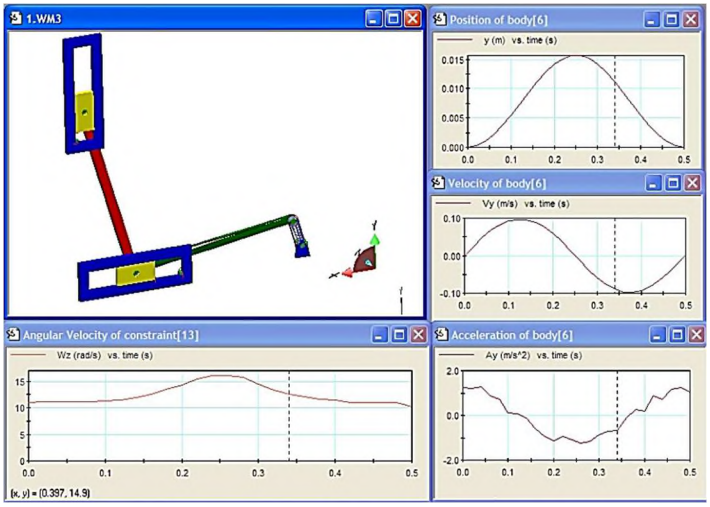


Рис. 8. Моделювання руху механізму штанцювального преса

Висновки. Запропоновано методику покращення кінематичних характеристик штанцювального преса та підтверджено її ефективність шляхом моделювання роботи механізму. Виведено аналітичні залежності для розрахунку часових інтервалів повороту кривошипа, необхідних для забезпечення руху зі змінною швидкістю сервопривода,

керування яким відбувається шляхом подачі імпульсів кроку та зміни напрямку повороту, при цьому інтервал між кроками двигуна регулює швидкість відповідно до заданого закону руху.

За допомогою цієї методики можливо коригувати закон руху механізму, покращуючи його кінематичні та енергосилові характеристики., що сприятиме підвищенню довговічності механізму та забезпечить більш плавний рух виконавчих ланок.

Список використаних джерел

1. Регей, І. І. (2011). *Споживче картонне паковання (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення).* УАД.

2. Четербух, О. Ю. & Шахбазов, Я. О. (2023). Визначення впливу закону періодичного руху приводного механізму рухомої натискної плити на кінематичні параметри плоскоштанцювального преса. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*, *57*, 75-81.

3. Пасіка, В. Р., Кузнєцов, В. О., Регей, І. І., & Влах, В. В. (2016). *Прес штанцювального автомата* (Патент України № 113347). Опубліковано 26 вересня 2016 року.

4. Влах, В. В. (2018). *Удосконалення штанцювального пресу застосуванням комбінованих механізмів приводу натискної плити* (Дисертація кандидата технічних наук).

5. Кузнєцов, В. О., Регей, І. І., & Влах, В. В. (2017). Модернізація механізму привода натискної плити у штанцювальному пресі. *Поліграфія і видавнича справа*, *1*, 56-62.

6. Полюдов, О. М. (2005). *Механіка поліграфічних і пакувальних машин*. УАД.

7. Терницький, С. В., Кандяк, Н. М., Влах, В. В. & Паламар, О. О. (2018). Комбінований механізм приводу натискної плити плоского штанцювального преса (експериментальна оцінка навантажень). *Наукові записки, 1*(56), 12-19.

References

1. Rehei, I. I. (2011). *Sposhyvche kartonne pakovannia (materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia) [Consumer cardboard packaging (materials, design, manufacturing equipment)].* UAD.

2. Cheterbukh, O. Yu. & Shakhbazov, Ya. O. (2023). Vyznachennia vplyvu zakonu periodychnoho rukhu pryvodnoho mekhanizmu rukhomoiu natsynknoi plyty na kinematychni parametry ploskoshantsiuvalnoho presa. [Determination of the influence of the periodic motion law of the drive mechanism of the movable pressure plate on the kinematic parameters of a flat-bed press.] *Avtomatyzatsiia vyrobnychnykh protsesiv u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making, 57*, 75-81.

3. Pasika, V. R., Kuznetsov, V. O., Rehei, I. I., & Vlah, V. V. (2016). Pres shantsiuvalnoho avtomata. Patent Ukrainy № 113347. [Press of an automatic punching machine (Ukrainian Patent No. 113347)]. Published on 26th September 2016.

4. Vlah, V. V. (2018). Udoskonalennia shantsiuvalnoho presu zastosuvanniam kombinovanykh mekhanizmiv pryvodu natsynknoi plyty [Improvement of a punching press by using combined drive mechanisms for the pressure plate] [PhD dissertation].

5. Kuznetsov, V. O., Rehei, I. I. & Vlah, V. V. (2017). Modernizatsiia mekhanizmu pryvodu natsynknoi plyty u shantsiuvalnomu presi. [Modernisation of the drive mechanism for the pressure plate in a stamping press.] *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing. 1*, 56-62.

6. Poliudov, O. M. (2005). *Mekhanika poligrafichnykh i pakuvalnykh mashyn. [Mechanics of printing and packaging machines].* UAD.

7. Ternytskyi, S. V., Kandiak, N. M., Vlah, V. V. & Palamar, O. O. (2018). Kombinovanyi mekhanizm pryvodu natsynknoi plyty ploskoho shantsiuvalnoho presa (eksperymentalna otsinka navantazhen). [Combined drive mechanism for the pressure plate of a flat stamping press (experimental load assessment)]. *Naukovi zapysky – Scientific Notes, 1*(56), 12-19.

Отримано 10.09.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 621.798.4

Nazar Kandiak[1], Yuriy Ostafiychuk[2]

[1]PhD, Docent, Associate Professor, Department of Computerized Systems of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: nazar.m.kandiak@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-4720-3935. **SCOPUS ID:** 57209415215

[2]Postgraduate Student, Department of Computerized Systems of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: Yurii.I.Ostafiichuk@lpnu.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0002-3906-0329

IMPROVEMENT OF KINEMATIC CHARACTERISTICS OF THE DIE-CUTTING PRESS DRIVE WITH A COMBINED CRANK-SLIDER MECHANISM

The key technological operation of the packaging manufacturing process is die-cutting, which directly determines the accuracy and quality of finished products. The implementation of technological processes of die-cutting is accompanied by significant energy consumption. Substantial inertial loads characterise the exploitation of die-cutting presses due to the massiveness of moving elements, which is combined with the needed technological loads. As a result, the modernisation of the drive mechanisms of die-cutting presses remains an urgent scientific and technical problem, the solution of which allows the increase of the manufacturing accuracy, energy consumption reduction and the cost of products.

Existing scientific developments to improve the kinematic characteristics of die-cutting presses often involve creating new, complex and expensive mechanisms. A more promising direction is optimising the motion law of the working parts (movable pressure plate) with subsequent adjustment of the motion of the input link of the mechanism, which allows improving the kinematic characteristics without structural changes to the design.

This study aims to develop a method for improving the kinematic and dynamic characteristics of the drive mechanism of a die-cutting press with a combined crank-slider mechanism. The method uses a servo drive to correct the input link motion. It determines mathematical dependencies for calculating the time intervals of controlling a servo motor with variable speed to implement a given motion law.

The work derives analytical dependencies to calculate the time intervals of crank rotation required to ensure the movement of the servo drive at variable speeds. Control is carried out by generating step pulses and signals to change the direction of rotation, while speed regulation is achieved by changing the interval between pulses.

The results of simulation modelling of the mechanism in the MSC Visual Nastran Desktop 4D environment and the construction of the corresponding graphical dependencies confirm the effectiveness of the proposed method. The proposed approach allows adjustment of the law of motion for mechanisms of various types, improving their kinematic and energy-power characteristics, leading to increased durability and smoother movement of the executive links.

Keywords: *die-cutting; die-cutting press; cardboard packaging; kinematic scheme; combined mechanism; drive; law of motion.*
Fig.: 8. References: 7.

Кандяк Н. М., Остафійчук Ю. І. Покращення кінематичних характеристик привода штанцювального преса із комбінованим кривошипно-повзунним механізмом. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 54-62. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-54-62.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-63-69
UDC 621.8

Peter Marcinko

Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of production systems and robotics
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)
E-mail: peter.marcinko@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2853-5755
ResearcherID: DFK-9265-2022. **Scopus Author ID:** 57200138054

DESIGN OF AN EDUCATIONAL STAND WITH ABB IRB 120 FOR ONLINE AND OFFLINE PROGRAMMING

The aim of this research is an educational robotic cell with an ABB IRB 120 that unifies the needs of university teaching and industrial training into a single modular and robust solution. The concept is based on a reconfigurable frame, standardized interfaces, and a design that prioritizes ease of part fabrication and maintenance. By leveraging a digital twin in ABB RobotStudio, offline programming, trajectory verification, and seamless transfer to online mode are enabled without interrupting operation. The work includes a comparison of available market stands according to criteria such as robustness, safety, flexible tool exchange, cost, and serviceability. We model multiple work configurations and end-effector variants while analyzing the relationship between the maximum mass of the handled object and jaw pressure based on static equilibrium, friction coefficient, and grasp geometry. Laboratory verification monitors cycle time, positioning accuracy, and repeatability, demonstrating the applicability of the solution for standardized exercises and operator training. The proposed cell lays the groundwork for further extensions, including machine vision, advanced safety functions, and IoT integration for real-time data collection and evaluation.

Keywords: *ABB IRB 120; programming; educational stand.*
Fig.: 6. References: 8.

Relevance of the research. The relevance of this research lies in linking academic instruction with real industrial requirements through a standardized, reconfigurable cell built around the ABB IRB 120 robot. The proposed solution enables universities and training centres to effectively develop the practical skills of students and operators in offline/online programming, occupational safety, and maintenance, directly increasing graduates' employability. Thanks to its modular architecture and the use of a digital twin in RobotStudio, the cell is scalable, quickly adaptable to new tasks, and suitable for continuous education in the context of Industry 4.0/5.0. For small and medium-sized enterprises, the proposed cell represents a low-cost entry point into robotics with measurable benefits, thereby supporting regional competitiveness and the resilience of supply chains. From a research perspective, the platform provides a unified environment for experiments with machine vision, IoT, and advanced safety functions, facilitating the transfer of practical experience into real-world applications by students.

Problem statement. The problem is the absence of an affordable, standardized, and reconfigurable educational cell that simultaneously meets the educational requirements of teaching and the operational demands of industry. Most available stands either do not support full-fledged offline/online programming with a seamless transfer to practice or fail to meet the requirement for simple maintenance that students can verify themselves. Documentation is also limited regarding the design of flanges (end-effector interfaces), the modularity of peripherals, and the manufacturability of parts for academic workshops. The aim, therefore, is to define the requirements and to design and experimentally validate an educational cell with an ABB IRB 120 that eliminates these shortcomings and provides a model for teaching and operator training.

Analysis of recent research and publications. Current educational stands for industrial robotics are primarily positioned as "ready-to-teach" platforms with an emphasis on rapid course ramp-up, safety, and compatibility with the manufacturer's industrial ecosystem. The Chinese MR101M (Jinan Minrry) solution represents a broad didactic set oriented toward the fundamentals of robotics, automation, and sensorics, while declaring support for multiple brands (KUKA, Stäubli, Denso, etc.). It's the benefit lies in the included equipment (mechanics, Programmable Logic Controller, computer control), yet it communicates less clearly the degree of hardware reconfigurability and the openness of interfaces for custom end-of-arm tooling development **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**. KUKA Ready2 educate targets

© P. Marcinko, 2025

a unified, mobile starter kit with the KR 4 AGILUS industrial robot and KR C5 controller, which brings high technological relevance but also a natural lock-in to proprietary software and peripherals. A clear strength is the seamless transition to industrial practice; a potential weakness is limited modularity outside the KUKA ecosystem **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**. Hytech (product brand) Didactic Robocell with a FANUC robot focuses on practical, real-time material-handling applications and the robustness of industrial hardware. Across the portfolio, there is a dominant orientation toward rapid deployment of vendor-grade components; recent overviews, however, lack detailed documentation of open mechanical interfaces, performance comparison metrics, and systematic support for a cross-vendor offline/online digital-twin workflow. These observations motivate research into an educational cell with ABB IRB 120 that combines industrial relevance with a reconfigurable design and an open, transparent methodology **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**.

Uninvestigated parts of a common problem. Alongside the stated objectives, several parts of the problem remain insufficiently explored in practice, despite their direct impact on teaching and industrial deployment. When transitioning from the RobotStudio offline environment to the real cell, systematic trajectory deviations regularly appear due to differences in tool calibration, TCP definition, and fixture compliance, yet a unified methodology for their correction is lacking. After mechanical interventions such as end-effector flange replacement, recalibration, or preventive maintenance it is rarely verified whether key parameters have changed. A quick, didactic before and after test that would reveal such shifts is missing. With the proper design of the robotic cell, some of these parameters can be verified directly 3.

Research objective. The objective of the research is to design, build, and experimentally validate a multifunctional educational stand with an ABB IRB 120 robot that is mobile, reconfigurable, and usable in both university and industrial environments. Based on an analysis of existing solutions, we define the concept and structure of the stand to enable rapid exchange of modules, flanges, and end effectors and to support packaging, sorting, and material-handling tasks. The research goal includes selecting cost-effective components, performing 3D modelling and manufacturing of parts using FFF (Fused Filament Fabrication), as well as implementing a digital twin for offline programming and trajectory verification. It also includes preparing robot programs for grasping, transferring, and placing parts. Through laboratory validation, we aim to quantify cycle time, positioning accuracy, repeatability, and the time required for reconfiguration between tasks, with the final output being a replicable reference design with documentation and a 3D visualization of operation.

The statement of basic materials. The proposed educational stand is built around the ABB IRB 120 industrial robot, whose compact kinematics and payload capacity of several kilograms make it suitable for manipulation, sorting, and the operation of simple fixtures in both laboratory and production environments. The stand's main structure is made of aluminium profiles with standardized T-slots, enabling rapid and repeatable repositioning of peripherals without the need to modify load-bearing elements. The choice of aluminium provides a favourable stiffness-weight ratio, easy machinability, and corrosion resistance, which are important in educational use for stand mobility, safe handling, and long-term serviceability. The overall dimensions 700 × 1200 mm, Fig. 1.



Fig. 1. ABB IRB 120 with stand

The robot is connected to the arm and the mounting plate via a flange compliant with ISO 9409-1. The flange interface and the end-effector adapter are custom made using PETG 3D printing, which lowers costs, enables rapid production of spare parts, and allows very fast fabrication of prisms of other sizes required for different objects. Material PETG was chosen for its good toughness, dimensional stability, and ease of printing without demanding a fully enclosed chamber; in an environment with frequent student interaction, the easy repairability and reproducibility of parts is also advantageous **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**.

To preserve TCP (Tool Centre Point) accuracy and long-term reliability, the flange's contact surfaces are designed with reinforced lead-in zones and threaded inserts at locations subject to repeated bolting. All tolerance critical surfaces that enter the tool definition in RobotStudio are measured after printing and, if necessary, fine-finished to minimize deviation between the digital twin and the real tool kinematics. The end effector is a parallel two-jaw gripper, type MHZL2-25D1, with interchangeable jaws. Its selection reflects the need for a universal grip for small to medium-sized objects in educational tasks, with the jaws likewise manufactured by 3D printing. The jaws are equipped with contact extensions made from 3D printed PETG and with replaceable rubber inserts, enabling laboratory experiments to demonstrate the influence of material and surface finish on safe holding force. The pressure in the pneumatic branch is adjustable via a local regulator with a pressure gauge mounted directly on the stand, allowing students to repeatedly verify the relationship between the set pressure and the actual gripping force, Fig. 2.

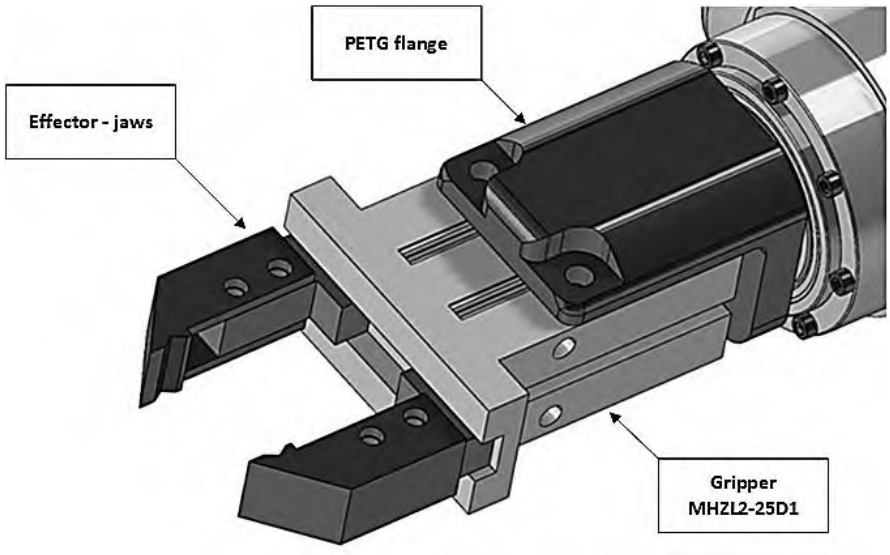


Fig. 2. Proposed end effector for easy manipulation task

The selected composition of materials and components pursues three main goals: proof of industrial applicability, low cost, and high replicability. The ABB IRB 120 provides the workstation with the same programming interface and philosophy that students will encounter in practice. Aluminum profiles supply a modular frame with long service life, while 3D printed PETG flanges, prisms, and pallets enable rapid iteration of curricular exercises without additional expenses and with minimal fabrication time. The result is a fully functional educational stand ready to perform various tasks in personnel training and in executing handling operations, with industrial robot programs designed to be flexibly adapted to changes in station layout and in the inclination of working planes. The combination of these basic materials forms the technical and methodological foundation on which standardized exercises can be built, parameters of cycle time, accuracy, and repeatability can be compared, and operating costs and maintenance demands can be kept at a level suitable for university laboratories. Fig. 3 representing proposed educational stand 5.

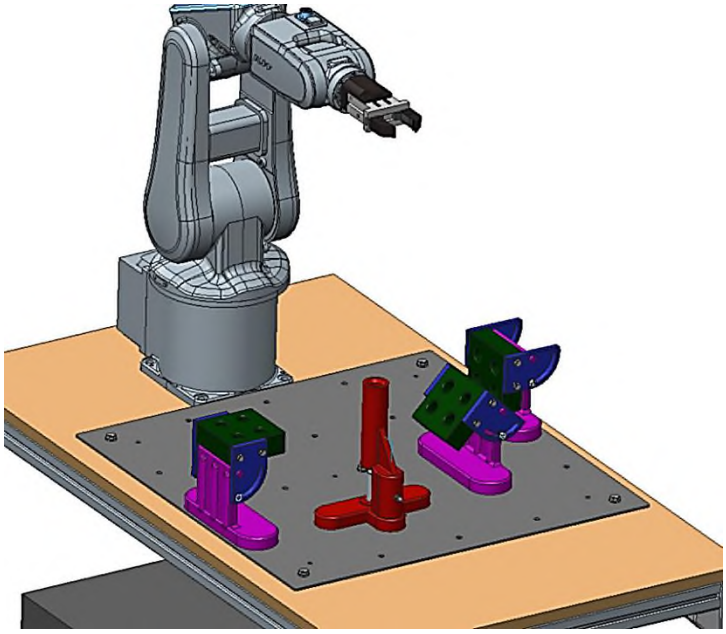


Fig. 3. Educational stand with robot ABB IRB 120

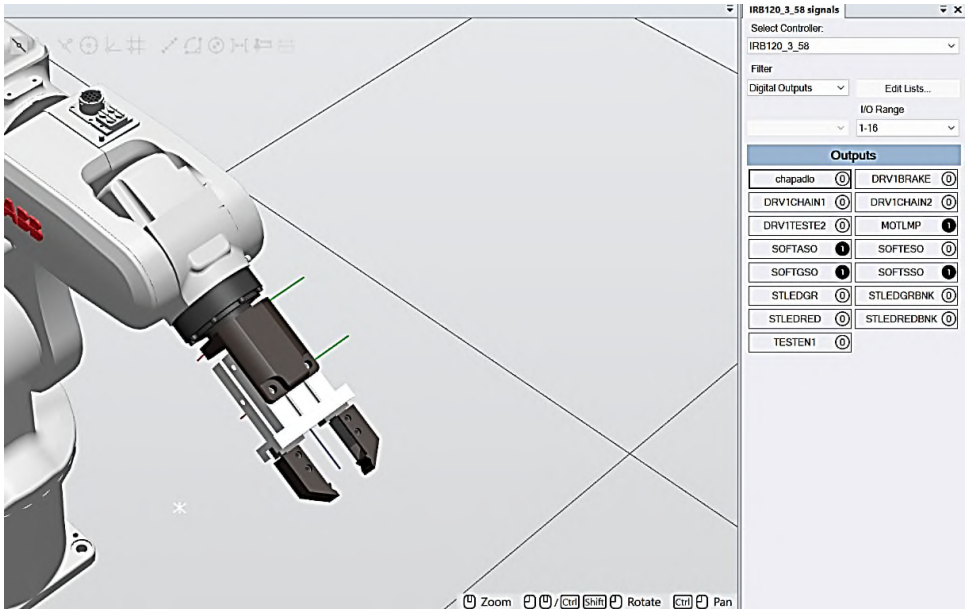


Fig. 4. Preparation I/O signals for end effector

Offline programming in ABB RobotStudio makes it possible to create a digital twin of the workstation, verify kinematics, and simulate trajectories without interrupting real operations. Within the environment, tools (TCP – Tool Centre Point), work frames (WorkObjects), and precise models of objects, pallets, and prisms are defined to minimize the gap between simulation and reality. The simulator enables collision, reach, and singularity detection, as well as cycle-time estimation at different speeds, accelerations, and motion types (joint, linear). RAPID programs are generated and debugged offline, including gripping logic and intermediate steps and then transferred to the controller with minimal correction. After basic calibration of the (TCP – Tool Centre Point) and WorkObjects, it is usually sufficient to fine-tune only reference points, which significantly shortens commissioning. Students can safely experiment with station layout variants, tooling, and trajectories, evaluating each change through simulation. The result is faster task iteration, higher safety, and validated procedures that are directly transferable to industrial practice 7.

When creating a program, you must start by defining points (targets) where the robot will perform its tasks, including the necessary approach points. After the program points are created, they should be merged into a single path. Timers and output instructions must also be added to this path to handle part manipulation. The final part of programming the stand is to set the motion type (Joint, Linear, Circular), configure zones, and specify speeds at the various points.

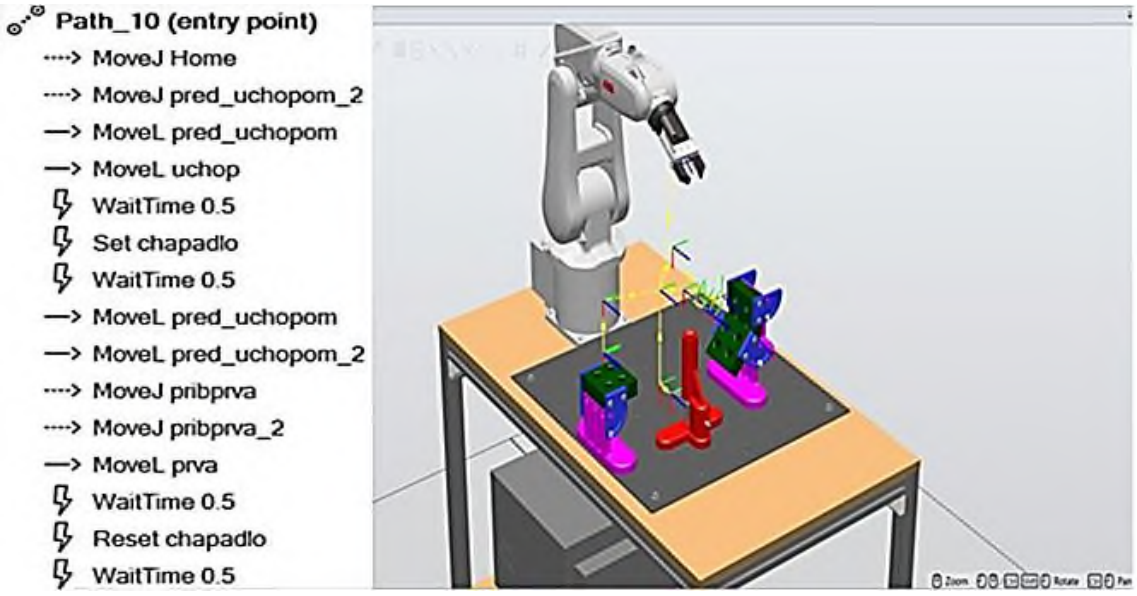


Fig. 5. Creating action and move instructions in RobotStudio

The outcome of our work was the development of a concept for an educational stand. It was necessary to design the main structural parts of the stand, their assembly, and their fastening. The result is a fully functional educational stand ready to perform various tasks in personnel training and in executing different handling operations. We also prepared the required program for the industrial robot, which can be flexibly modified if the positions of stand components on the mounting plate or the inclination angle of the pallet plane change, using new WorkObjects.

From the robot arm, we routed compressed-air hoses to the pneumatic gripper, which will be used to open and close the gripper. The pallet with four holes for placing parts is equipped with a wing nut to allow simple and quick fastening of the pallet surface at the desired angle. All parts of the stand are securely attached to the mounting plate and can be quickly reconfigured if needed.

An electro-pneumatic valve switches the direction of compressed air based on a signal from the robot controller. Compressed air is supplied to the valve inlet and, depending on the controller signals, is directed either to outlet 2 or outlet 4, enabling the pneumatic gripper to close

and open. We connected two sensors to the pneumatic gripper, which transmit to the robot controller whether the gripper is in the closed or open state, and everything can be monitored online using RobotStudio.

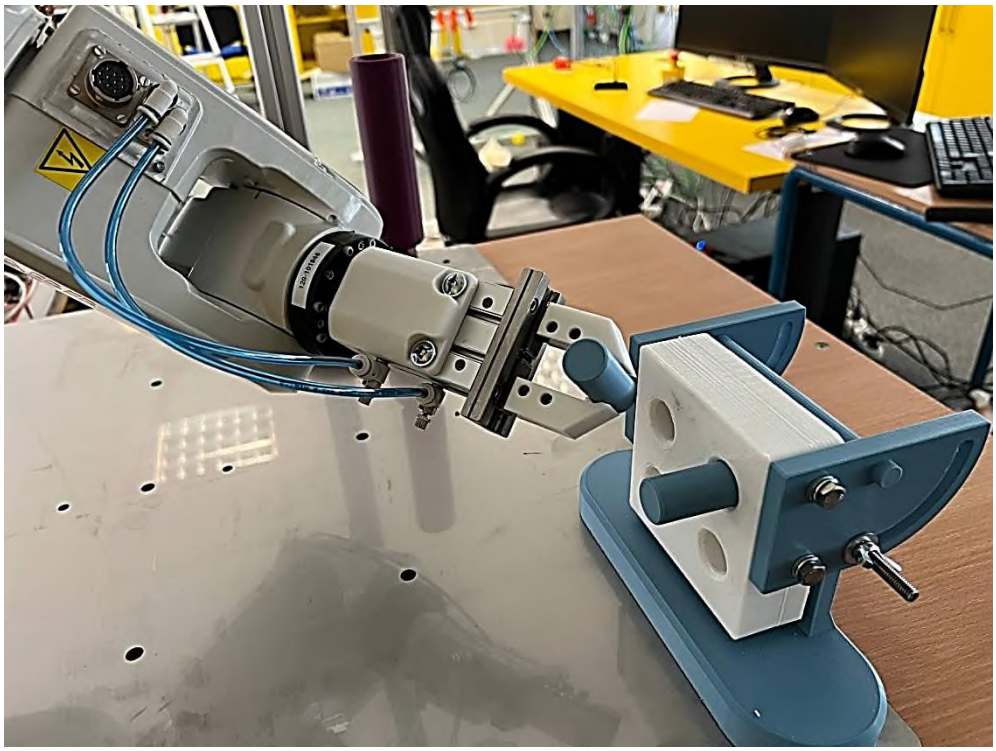


Fig. 6. Educational stand

Conclusions. The developed educational stand can be used to train university students and employees of companies that utilize robotic solutions in their technological processes. Thanks to its construction, it can also serve as a production device a readily adaptable, multipurpose stand capable of performing packaging and product-sorting operations as an independent process.

In this work, we considered existing educational and training stands, analysed their advantages and disadvantages, and on that basis determined the concept and structure of our stand. We also analysed the pros and cons of different types of industrial robots and selected the model that best fits the given tasks. We chose components for our stand that would allow us to solve all design tasks as efficiently and economically as possible. We worked on the stand's design to ensure it is mobile and easily configurable for various tasks. We created 3D models of the components and units of the developed stand and generated programs for 3D printers that enabled us to print the necessary parts. We performed the necessary calculations to assess the effectiveness and reliability of the proposed assemblies of the stand. We created several variants of robot programs for grasping, transferring, and placing parts. A 3D visualization of the operation of the training stand was developed and implemented. The mounting design of the stand's modules on the base plate enables quick and flexible changes to the tasks performed by the operator during the training process. The developed modules are reliable and simple, easily reproducible by 3D printing, and low-cost. The stand we developed has a multifunctional design that allows it to fulfil various tasks in the professional training of students and company employees.

Statement on use of AI and AI-based technologies in the process of article writing.

The author(s) used [ChatGPT 5.0] – [translate] while writing this material. After using this tool/service, the author(s) have reviewed and edited the content as necessary and take full responsibility for the content of the article.

Acknowledgements

This article was created thanks to the VEGA project support: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

References

1. Minrry Education. (2025). *Industrial robot educational equipment: Mechatronics training equipment*. Retrieved June 19, 2025. https://minrry-education.com/products/industrial-robot.

2. KUKA. (2025). *KUKA ready2_educate* [Online]. Retrieved June 19, 2025. https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/kuka-ready2_use/kuka-ready2_educate.

3. Hytech Didactic. (2025). *Handling Robocell with PLC & IIOT* [Online]. Retrieved June 20, 2025. https://hytechdidactic.com/manufacturer-of-handling-robocell-plc-iiot-pune.

4. Marcinko, P., Semjon, J., & Jánoš, R. (2021). *Vytváranie robotických buniek pomocou offline prostredia ABB RobotStudio I* (1st ed.). Košice: Technická univerzita v Košiciach. [CD-ROM].

5. Marcinko, P. (2022). *The use of SmartComponents in the design of complex robotic workplaces*. *Technical Sciences and Technologies, 29*(3), 52-58. Chernihiv National University of Technology.

6. Marcinko, P., Jánoš, R., & Varga, J. (2024). *Vytváranie robotických buniek pomocou off-line prostredia ABB RobotStudio II* (1. vyd.). Košice: Technická univerzita v Košiciach. ISBN 978-80-553-4732-5.

7. The use of SmartComponents in the design of complex robotic workplaces: Marcinko, P., Kovaľuk, D., 2022. In: Technical Sciences and Technologies. - Černihiv (Ukrajina) Chernihiv National University of Technology Roč. 29, č. 3 (2022), s. 52-58. ISSN 2411-5363.

8. Mamontov, A. Návrh edukačného standu s robotom ABB IRB 120. Diplmová práca. Košice. 2025.

Отримано 19.09.2025

УДК 621.8

Петер Марцінко

доцент, доцент кафедри виробничих систем та робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)
E-mail: peter.marcinko@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-2853-5755
ResearcherID: DFK-9265-2022. **Scopus Author ID:** 57200138054

ПРОЄКТУВАННЯ НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДА З ABB IRB 120 ДЛЯ ОНЛАЙН ТА ОФЛАЙН ПРОГРАМУВАННЯ

Метою цього дослідження є створення навчальної робототехнічної камери з ABB IRB 120, яка об'єднує потреби університетського навчання та промислового навчання в єдине модульне та надійне рішення. В основі концепції лежить реконфігурована рама, стандартизовані інтерфейси та конструкція, що надає пріоритет простоті виготовлення деталей та технічного обслуговування. Завдяки використанню цифрового двійника в ABB RobotStudio, офлайн-програмування, перевірка траєкторії та безперебійний перехід в онлайн-режим можливі без переривання роботи. Робота включає порівняння доступних ринкових стендів за такими критеріями, як міцність, безпека, гнучкість заміни інструментів, вартість та зручність обслуговування. Ми моделюємо різні конфігурації роботи та варіанти кінцевих виконавчих механізмів, аналізуючи взаємозв'язок між максимальною масою оброблюваного об'єкта та тиском захвату на основі статичної рівноваги, коефіцієнта тертя та геометрії захвату. Лабораторна перевірка контролює час циклу, точність позиціонування та повторюваність, демонструючи придатність рішення для стандартизованих вправ та навчання операторів. Запропонована камера створює основу для подальших розширень, включаючи машинний зір, вдосконалені функції безпеки та інтеграцію IoT для збору та оцінки даних у реальному часі.

Ключові слова: *ABB IRB 120; програмування; навчальний стенд.*

Рис.: 6. Бібл.: 8.

Marcinko, P. (2025). Design of an educational stand with ABB IRB 120 for online and offline programming. *Technical sciences and technologies,* (3(41)), 63-69. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-63-69.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-70-78
УДК 621.9

Сергій Михайлович Бехало

аспірант кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: s.bekhalo@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-0682-8434. **ResearcherID:** MSW-8637-2025

ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ БОРОШНОМЕЛЬНИХ ВАЛЬЦІВ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ГЛИБИНИ ОБРОБКИ ПОВЕРХНІ

Однією з актуальних науково-технічних задач є підвищення ресурсу деталі та обладнання, що напряму впливає на економічну складову його використання. Борошномельне виробництво також стикається з необхідністю заощаджувати. У роботі наведено загальну характеристику борошномельних вальців та технологічного процесу відновлення їх робочої поверхні. Зроблено та теоретично обґрунтовано припущення щодо можливого зменшення глибини обробки на стадії шліфування, що в подальшому дозволить підвищити загальний ресурс борошномельних вальців. Визначено можливі проблеми практичного впровадження наведеної оптимізації та варіанти їх подолання. Описано додатковий позитивний ефект імплементації дослідження.

Ключові слова: *борошномельний валець; рифля; шліфування; глибина обробки; оброблювана поверхня; чавун; різання; вимірювання; оптимізація.*

Рис.: 5. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Збільшення ресурсу будь-якої деталі чи механізму безпосередньо впливає на економічну складову їх використання. Ця залежність виражається в тому, що збільшення терміну ефективної експлуатації умовної одиниці обладнання при незмінній їхній вартості зменшує затрати на ремонт чи заміну такого обладнання. Особливо актуальним питання продовження терміну експлуатації обладнання є для підприємств України, які вже четвертий рік працюють в умовах війни та пов'язаних з нею викликами. До питання економії коштів додається пошкодження, повне знищення або закриття виробничих потужностей, що виготовляли деталі чи комплектуючі для обладнання вітчизняних підприємств. Ця проблема стосується і борошномельної галузі країни, де одним із найпоширеніших типів борошномельного обладнання залишається вальцьовий верстат типу А1-БЗН з вальцями виробництва ПрАТ «Могилів-Подільський машинобудівний завод» (не працює у теперішній час). Інвестиції в капітальний ремонт таких вальців із заміною їхньої циліндричної частини або ж повну модернізацію обладнання із заміною вальцьових верстатів значно перевищують можливі витрати на продовження строку служби наявних вальців. Покращення технології обробки поверхні борошномельних вальців направлене на зменшення глибини шліфування та різання, що в свою чергу збільшить загальний ресурс цієї комплектуючої.

Постановка проблеми. Відновлення поверхні вальців виконується у два етапи: шліфування та нарізання рифлів, які здійснюються на спеціальних шліфувально-рифельних верстатах. Сумарне зменшення діаметра вальців (початковий діаметр – 250,0 мм) після повного циклу обробки становить 0,25-1,00 мм залежно від параметрів нанесення рифлі, при цьому в разі зменшення діаметра вальців до показника $\varnothing \leq 242$ мм ефективність їх використання значно знижується через зниження виходу борошна та збільшення частки побічних продуктів. За таких умов кількість операцій відновлення поверхні вальця складає від 8 (у разі зменшення діаметра вальця на 1,00 мм) до 32 (при зменшенні діаметру вальця на 0,25 мм). Враховуючи одночасне використання на борошномельному заводі вальців з різними параметрами нарізання рифлі, ефективнішим є використання схеми перестановки вальців залежно від крупності помелу, при цьому показник кількості операцій з відновлення їх поверхні не буде близький до мінімальної межі, що вже дозволяє збільшити ресурс вальців. Подальше збільшення ресурсу борошномельних вальців вбачається шляхом зменшення глибини обробки поверхні.

© С. М. Бехало, 2025

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інформація про вальцьове подрібнююче обладнання та конструктивні особливості основних функціональних складальних його одиниць, наведена в роботі [1], дає загальне уявлення про обладнання борошномельної галузі. У праці [2] описані останні досягнення у визначенні оброблюваності через знос інструменту, силу різання та температуру, форму та крихкість стружки, цілісність поверхні, а також розглянуті передові методи покращення оброблюваності. Дослідженням механічної оброблюваності зносостійких чавунів займались автори [3, 4], які обґрунтували матеріал, оптимальні геометричні параметри різальних інструментів, встановили характер впливу умов обробки зносостійких чавунів на основні показники процесу – стійкість різального інструменту й режими різання залежно від твердості матеріалу [3] – та порівняли умови обробки ущільненого графітового чавуну, сірого чавуну і сфероїдального графітового чавуну, дослідили вплив мікроструктури, хімічного складу, а також інших змінних (ріжучий інструмент, методи змащування та охолодження тощо) на процес обробки [4]. Аналіз температурного аспекту процесу різання високоміцних чавунів досліджено у працях [5; 6]. Авторами зроблено порівняльний аналіз температур різання та складових сил для сірих чавунів, чавунів з вермикулярним графітом і високоміцних чавунів з кулястим графітом [5], на основі експериментальних та модельованих даних встановлено взаємозалежність швидкості різання, подачі та глибини обробки з підвищенням температури та сил різання [5; 6]. Контактні процеси на робочих поверхнях та умови зношування різальних лезових інструментів, вплив умов різання на величини параметрів зношування, стійкість інструменту й допустиму швидкість різання, рекомендації щодо запобігання зношуванню інструментів тощо досить детально наведено у посібнику [7].

Виділення недослідженої частини загальної проблеми. Вивчення актуальних досліджень та останніх публікацій з тематики показало, що переважна їх частина направлена на дослідження механічної обробки, вплив режимів різання, дослідження ріжучих інструментів тощо. У той час як поточне дослідження спрямоване на вивчення можливості зменшення глибини обробки поверхні вальця за рахунок покращення аналізу поверхні до її шліфування та оптимізації глибини нарізання рифлі з урахуванням отриманих результатів такого аналізу.

Метою статті є теоретичне дослідження можливості збільшення ресурсу борошномельних вальців шляхом зменшення глибини обробки поверхні під час регламентного перенарізання рифлі. Як похідна мета, вбачається розглянути перспективи та напрямки подальших досліджень, а також коротко проаналізувати додаткові вигоди від здійсненого дослідження.

Виклад основного матеріалу. Для кращого розуміння досліджуваного питання слід навести основні вихідні дані оброблюваної поверхні борошномельних вальців. Бочки робочих вальців виконують двошаровими, зовнішній шар зі спеціального чавуну, а внутрішній – із сірого. Склад чавуну робочого шару приблизно наступний: вуглецю 3-3,5 %, кремнію 0,8-1,5 %, марганцю 0,55-1,2 %, хрому 0,8-1,4 %, нікелю 1,5-2,5 %, молібдену 0,25-0,45 % [1]. Склад чавуну робочого шару варіюється залежно від виробника вальців та зазвичай є комерційною таємницею, при цьому твердість робочого шару дещо зменшується від верхньої точки до нижньої, що пояснюється технологією відцентрового лиття.

Профіль рифлі вальця визначається кутом вістря α (20-35º), величина якого визначається положенням грані вістря і кутом спинки β (60-70º), в утворенні якого прийняла грань спинки. Ці дві грані утворюють кут загострення рифлі θ (100-110º). З метою збільшення терміну експлуатації вальців на вершинах рифлів залишають невелику площадку шириною a, з раніше існуючої циліндричної поверхні (рис. 1) [1].

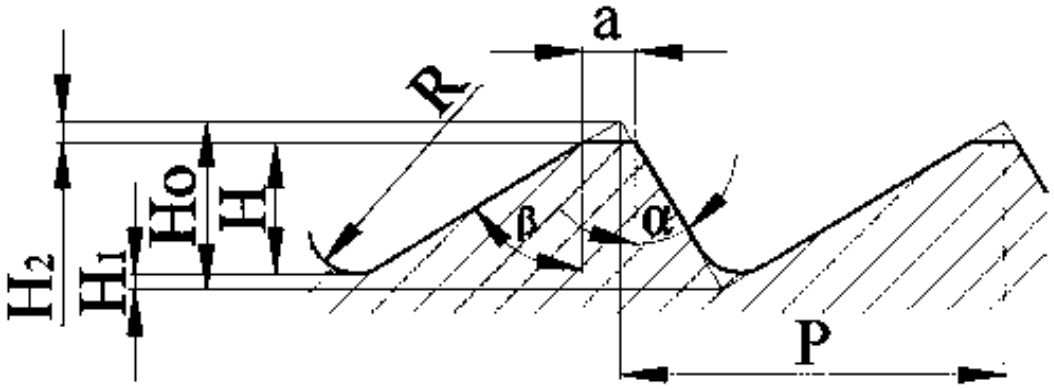


Рис. 1. Профіль рифлі вальцьового верстата [1]

Наявність площадки *а* додатково зумовлена особливостями самого процесу помелу пшениці. Так, на практиці борошномельні вальці, що використовуються у вальцьових верстатах з найбільшою крупністю помелу, за умови гострої форми вістря рифлі (без площадки *а*) не перемелюють сировину, а подрібнюють її, у результаті чого порушується технологія виготовлення борошна й занадто подрібнені частинки засмічують очищувальні комплектуючі борошномельного комплексу, що призводить до втрат сировини та додаткових дій робочого персоналу.

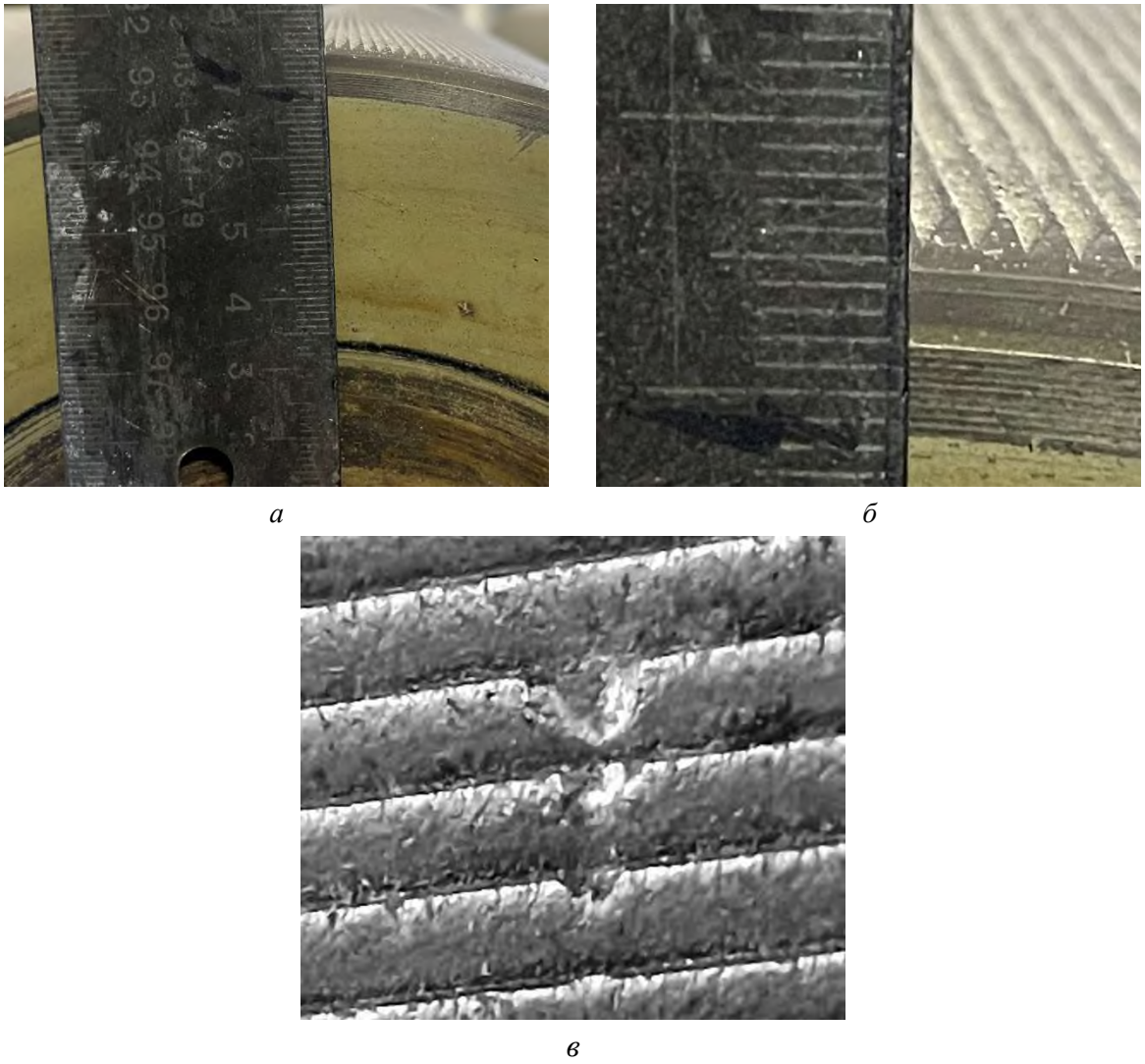
Нарізку рифлів здійснюють під ухилом до прямолінійної твірної циліндричної поверхні. Це дозволяє знизити вібраційну складову процесу подрібнення, а також регулювати ступінь подрібнення частинок, яка зі збільшенням ухилу також збільшується. Ухил рифлів визначається тангенсом кута нахилу рифлів до циліндричної твірної, вираженим у відсотках (від 4 до 10 %) [1].

Густина нарізки рифлів, тобто кількість рифлів, що припадають на 10 мм окружності вальців, визначається правилами технологічного процесу борошномельного виробництва та залежно від крупності помелу цей показник може варіюватись від 3 до 12.

Нарізанню рифлі при відновленні поверхні передує процес шліфування вальця. Глибина шліфування визначається висотою рифлі Н (рис. 1) та становить до 0,5 мм. Процес шліфування, як і процес нарізання рифлі, здійснюється на спеціальних шліфувально-рифельних верстатах.

Проаналізувавши наведені вихідні дані, допускається можливим зменшення глибини обробки при шліфуванні вальця та нарізанні рифлі за рахунок попереднього вимірювання мінімальної висоти рифлі, наданого на відновлення вальця для врахування цього показника при шліфуванні.

Стосовно зменшення глибини шліфування, підставою для такого припущення є те, що поверхня вальця, який передається на обробку, може бути неоднорідною (рис. 2) і висота рифлі Н після використання вальця у процесі виробництва зазвичай не є рівною 0. Ця умова не стосується вальців останніх помольних систем, які не мають рифлі. Однак слід зауважити, що в процесі виробничого використання борошномельний валець може зазнати наднормативних пошкоджень, у результаті чого відбувається відділення частинок поверхні рифлі, яке можна візуально виявити без спеціальних приладів.



а *б*

в

Рис. 2. Поверхня борошномельного вальця після його використання:
а – оригінальний розмір; б – 5-кратне збільшення,
в – пошкоджена поверхня (5-кратне збільшення)

Джерело: розроблено автором.

Доцільно припустити, що при розрахунку показника глибини шліфування має враховуватись показник найменшого значення висоти рифлі конкретного вальця H_{min}. Таким чином, одним зі шляхів зменшення глибини шліфування і в подальшому збільшення ресурсу вальця є попереднє дослідження поверхні вальця на предмет виявлення найменшого значення висоти рифлі. Найпростіше візуальне обстеження є достатнім для виявлення значних пошкоджень рифлі та прийняття рішення щодо подальшого продовження аналізу робочої поверхні вальця.

Після виявлення найменшого значення висоти рифлі H_{min} (при $H_{min} > 0$) шліфування поверхні вальця можна буде здійснювати на глибину $t = H - H_{min}$, у результаті чого схематичне зображення поверхні вальця матиме такий вигляд (рис. 3).

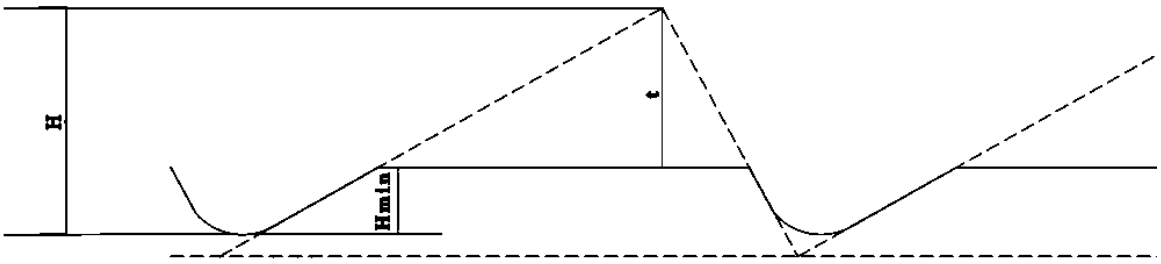


Рис. 3. Схематичне зображення поверхні вальця після шліфування на глибину t
Джерело: розроблено автором.

Впровадження такої оптимізації процесу шліфування поверхні борошномельного вальця може позитивно вплинути не лише на ресурс вальця, а й на ресурс шліфувального інструменту та енергозатрати на шліфування, адже зі зменшенням глибини шліфування зменшується і зношування поверхні шліфувального інструменту та енергоємність цього процесу. Так, у роботі [5] наведено закономірність про те, що температура та сили різання зростають зі збільшенням швидкості різання (Vc), подачі (Sz) та глибини різання (t), незалежно від типу чавуну чи охолоджувального середовища, оскільки це зумовлено посиленням пластичної деформації та збільшенням швидкості тертя між стружкою та інструментом.

Зменшення глибини шліфування додатково зменшить і температурний вплив на оброблюваний валець, що також сприятиме збільшенню ресурсу робочої поверхні, оскільки високі температури в робочій зоні, які виникають у результаті обробки шліфуванням, можуть завдавати термічних пошкоджень оброблюваній поверхні. Похідним позитивним ефектом також можна відзначити зменшення утворення відходів у результаті шліфування, що буде доброю екологічною тенденцією.

Додаткового дослідження потребує процес вимірювання мінімальної висоти рифлі оброблюваного вальця і в разі розробки ефективного та економічно обґрунтованого способу вимірювання цієї величини таке теоретичне дослідження можливе до імплементації в реальних умовах. При цьому це впровадження матиме економічний ефект і для підприємства, що виконує роботи з відновлення поверхні борошномельних вальців, адже частково зменшаться такі складові собівартості робіт, як витрати на споживану шліфувально-рифельним верстатом електроенергію та на шліфувальний інструмент, тоді як вартість однієї операції перенарізання рифлі можна залишити незмінною.

Серед проблемних питань, що можуть виникнути при експериментальному дослідженні наведеної оптимізації процесу шліфування борошномельного вальця, попередньо вбачається підвищення зносу різального інструменту на наступному технологічному процесі – нарізанні рифлі. Така негативна обставина прогнозується через те, що в заглибленнях між рифлями можуть залишатись часточки шліфувального інструменту, відділені в результаті його абразивного зносу, які негативним чином впливатимуть на різець. У випадку підтвердження цього припущення доцільним буде розглянути раціональність заміни операції шліфування поверхні вальця на її токарну обробку або модернізації геометрії різця для покращення процесу різання і стружкоутворення. Достатньо детальний опис як самого процесу різання, так і можливостей до покращення оброблюваності, наведені у дослідженні [2].

Наступним після шліфування йде технологічний процес нарізання рифлі. Зазвичай нарізання рифлі здійснюється на умовно рівній поверхні борошномельного вальця, яку отримують після його шліфування. У запропонованому вище варіанті шліфування на глибину t поверхня вальця не буде умовно рівною, оскільки залишиться частина попередньої

рифлі висотою H_{min} (рис. 3). За таких умов процес нарізання рифлі на шліфувально-рифельному верстаті ускладнюється, адже верстат важливо відрегулювати таким чином, щоб для отримання заданих параметрів обробленої поверхні була врахована існуюча геометрія оброблюваної поверхні.

Допускається, що правильне налаштування шліфувально-рифельного верстата дозволить зберегти закладену на етапі шліфування тенденцію на збільшення ресурсу борошномельного вальця. При неправильному налаштуванні обладнання збережений ресурс вальця на попередньому технологічному процесі – шліфуванні – буде змарнований, сам валець доведеться повторно шліфувати, що призведе до підвищення витрат на відновлення робочої поверхні та додаткового зменшення ресурсу вальця.

Під правильним налаштуванням процесу нарізання рифлі розуміється таке розміщення різця (рис. 4), при якому його вістря (положення різця 1) знаходиться безпосередньо над заглибленням оброблюваної поверхні, що залишилось після процесу шліфування, та при початку процесу різання сам різець займає умовне положення 2, а при наступному робочому ході – умовне положення 3.

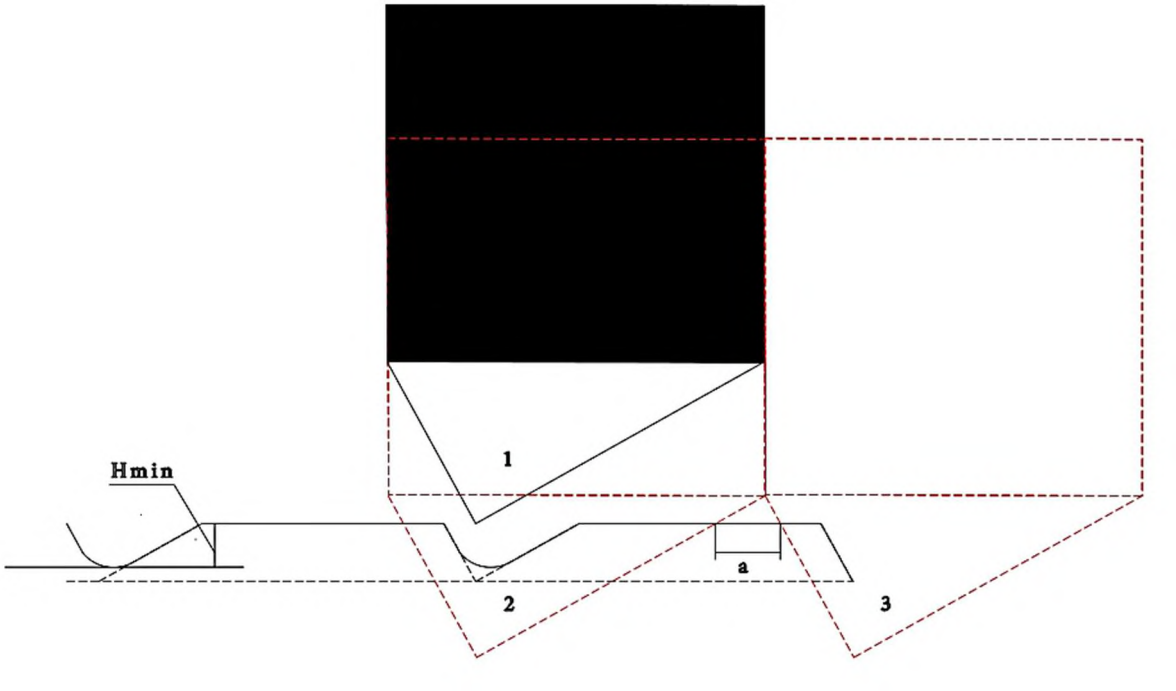
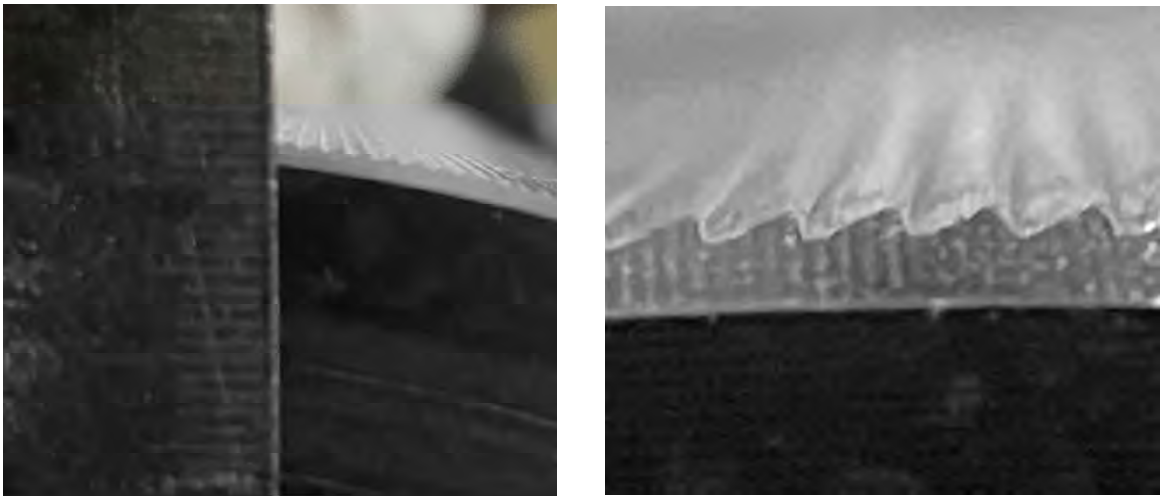


Рис. 4. Схематичне зображення правильного розташування різця
Джерело: розроблено автором.

Додатковими параметрами для контролю та врахування при налаштуванні процесу різання мають бути ухил та густина нарізки рифлі, адже їх неврахування призведе до порушення геометрії обробленої поверхні борошномельного вальця і, відповідно, додаткових втрат на усунення цього дефекту. Вимірювання таких величин не потребує додаткових досліджень, оскільки наявні вимірювальні прилади повною мірою забезпечують належний рівень точності.

Успішним завершенням відновлення поверхні борошномельного вальця вважатиметься отримання заданої її форми (рис. 5).



а *б*

Рис. 5. Поверхня борошномельного вальця після перенарізання рифлі: а – оригінальний розмір; б – 5-кратне збільшення

Джерело: розроблено автором.

Похідним позитивним ефектом прогнозується незначне зменшення кількості утворення стружки в результаті нарізання рифлі через зменшення площі знятого шару на величину площі заглиблення, що залишиться після шліфування на зменшену глибину як описано вище.

Висновки. У роботі зроблено теоретичне дослідження збільшення ресурсу борошномельних вальців за рахунок зменшення глибини їх шліфування. Результат дослідження напряму залежить від величини найменшого значення висоти рифлі H_{min} та не буде постійним, адже вважається, що названа величина буде змінною. При цьому наявність значних пошкоджень (рис. 2) рифлі вальця не дозволятиме застосовувати описану в цій роботі методику через подальше залишення/виникнення дефектів робочої поверхні вальця. Також важливим аспектом вбачається правильне налаштування шліфувально-рифельного верстату на стадії нарізання рифлі для недопущення браку.

Серед похідних позитивних результатів можна виділити зменшення споживання енергії шліфувально-рифельним верстатом під час шліфування, збільшення терміну служби шліфувального інструменту та зменшення кількості відходів через зменшення глибини шліфування при незмінній для замовника вартості роботи.

На наступних стадіях планується проаналізувати існуючі технології для аналізу поверхонь з метою визначення найбільш раціональної з них для вимірювання найменшої висоти H_{min} рифлі оброблюваного вальця та можливості її використання перед технологічним процесом відновлення поверхні борошномельного вальця. Доцільним буде розрахувати кількісні показники енергоефективності, збільшення ресурсу шліфувального інструменту та покращення екологічності процесу шліфування. Подальші дослідження можливих шляхів оптимізації також будуть направлені на вивчення впливу геометрії різця, його матеріалу, сучасних технологій змащування та охолодження тощо на процес різання. При цьому корисними будуть роботи [2-7] та інші.

Список використаних джерел

1. Петров, В. М. (2019). *Вальцьове подрібнююче обладнання*. Одеська державна академія будівництва та архітектури (ОДАБА).

2. Liao, Z., Schoop, J. M., Saelzer, J., Bergmann, B., Priarone, P. C., Splettstößer, A., Bedekar, V. M., Zanger, F., & Kaynak, Y. (2024). Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *50*, 151-184. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.008.

3. Derbaba, V., Patsera, S., & Hryhorenko, V. (2022). Features of mechanical processing of wear-resistant cast iron. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, *71*, 217-230. https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217.

4. Sirtuli, L. J., Bermejo, J. M. B., Windmark, C., Norgren, S., Ståhl, J.-E., & Boing, D. (2024). Machining of compacted graphite iron: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 118553. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553.

5. da Silva, L. R. R., Filho, A. F., Costa, E. S., Marcucci Pico, D. F., Sales, W. F., Guesser, W. L., & Machado, A. R. (2018). Cutting temperatures in end milling of compacted graphite irons. *Procedia Manufacturing*, *26*, 474-484. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.056.

6. Антонюк, В. С. (2025). Аналіз температур у зоні різання та сил різання при лезовій обробці чавуну з вермикулярним графітом. *Технічна інженерія*, (1(95), 19-23. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-19-23.

7. Внуков, Ю. М., & Залога, В. О. (2024). *Зношування і стійкість різальних лезових інструментів* (2-ге вид.). Сумський державний університет.

References

1. Petrov, V. M. (2019). Valtsove podribniuiuche obladnannia. [Rolling mill crushing equipment]. *Odeska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury (ODABA)- Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture (ODABA).*

2. Liao, Z., Schoop, J. M., Saelzer, J., Bergmann, B., Priarone, P. C., Splettstößer, A., Bedekar, V. M., Zanger, F., & Kaynak, Y. (2024). Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 50, 151-184. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.008.

3. Derbaba, V., Patsera, S., & Hryhorenko, V. (2022). Features of mechanical processing of wear-resistant cast iron. Collection of Research Papers of the National Mining University, 71, 217-230. https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217.

4. Sirtuli, L. J., Bermejo, J. M. B., Windmark, C., Norgren, S., Ståhl, J.-E., & Boing, D. (2024). Machining of compacted graphite iron: A review. Journal of Materials Processing Technology, 118553. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118553.

5. da Silva, L. R. R., Filho, A. F., Costa, E. S., Marcucci Pico, D. F., Sales, W. F., Guesser, W. L., & Machado, A. R. (2018). Cutting temperatures in end milling of compacted graphite irons. Procedia Manufacturing, 26, 474-484. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.056.

6. Antoniuk, V. S. (2025). Analiz temperatur u zoni rizannia ta syl rizannia pry lezovii obrobtsi chavunu z vermykuliarnym hrafitom. [Analysis of temperatures in the cutting zone and cutting forces during blade machining of cast iron with vermicular graphite.] *Tekhnichna inzheneriia – Technical Engineering,* (1(95)), 19-23. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-19-23.

7. Vnukov, Yu. M., & Zaloha, V. O. (2024). Znoshuvannia i stiikist rizalnykh lezovykh instrumentiv (2nd ed.).[Wear and resistance of cutting blade tools (2nd edition).] *Sumskyi derzhavnyi universytet – Sumy State University.*

Отримано 20.09.2025

UDC 621.9

Serhii Bekhalo

PhD Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine)
E-mail: s.bekhalo@pmtkm.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-0682-8434. **ResearcherID**: MSW-8637-2025

INCREASING THE RESOURCE OF THE FLOUR MILLING ROLLERS DUE TO REDUCING THE DEPTH OF SURFACE PROCESSING

One of the current scientific and technical tasks is to increase the service life of parts and equipment, which directly affects the economic component of their use. The flour milling industry, especially in conditions of martial law, needs effective solutions to increase the equipment's resource, taking into account the fact that some production facilities have been closed.

This paper attempts to theoretically substantiate the possibility of increasing the service life of flour milling rollers, since one of the plants that produced them was closed. Optimizing the restoration of the roller's surface will be more financially beneficial than its major repair or complete replacement of the equipment.

The aim of the article is to investigate the theoretical possibility of increasing the service life of flour milling rollers by reducing the depth of surface machining during re-grooving. Additionally, it is planned to consider the prospects for further research and make a brief analysis of the derived benefits of the results obtained.

The paper provides a general description of flour milling rollers and the process of restoring their working surface. An assumption is made and theoretically substantiated about the possible reduction of the processing depth at the grinding stage. This assumption is based on the theoretical possibility of adjusting the grinding-fluting machine for high-quality cutting of the flute, provided that part of the previous flute with a height of H_{min} is left. The rationality of implementing the results of this study will depend on the chosen method of preliminary analysis of the roller's surface before its processing. Possible problems with the implementation of the results may be: the need for more precise adjustment of the grinding-fluting machine when cutting the flute, possible increased wear of the cutting tool. An additional positive effect of implementing the results of this work is described.

The result of possible optimization directly depends on the indicator of the smallest value of the flute height H_{min} and will not be constant due to the variability of this value. Significant damage to the flute excludes the possibility of applying the method described in this work. Derivative positive results will be a decrease in energy consumption by the grinding-fluting machine during grinding, an increase in the service life of the grinding tool and a partial reduction in the amount of waste.

***Keywords**: flour milling roller; flute; grinding; machining depth; processed surface; cast iron; cutting; measurement; optimization.*

Fig.: 5. References: 7.

Бехало С. М. Збільшення ресурсу борошномельних вальців шляхом зменшення глибини обробки поверхні. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 70-78. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-70-78.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-79-90
УДК 621.375.826:621

Максим Вікторович Романенко[1], Олексій Дмитрович Кагляк[2], Віктор Васильович Романенко[3]

[1]аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: romanenkomax.ua@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-8803-2278

[2]кандидат технічних наук, завідувач кафедрою лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-5602-543X

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1918-7090

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАЗОЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МАЛОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПОТУЖНИМ ЛАЗЕРОМ

Розглянуто конструкцію, конфігурацію та склад технологічного обладнання, яке працює з використанням потужного лазерного випромінювання. Створено новий підхід для визначення максимально можливих швидкостей різання заготовок різної товщини із маловуглецевих сталевих листів. Проведено аналіз впливу типу і тиску технологічного газу, а також параметрів фокусування лазерного променя на швидкість різання маловуглецевих сталей у різних товщинних діапазонах. Сформульовано узагальнені рекомендації для призначення оптимальних умов різання сталевих листів в діапазоні товщин від 5 до 80 мм.

Ключові слова: *лазер; газолазерне різання; маловуглецева сталь; оптимальна швидкість різання; умови фокусування та розфокусування лазерного випромінювання.*

Актуальність теми дослідження

Лазерне різання металів є важливим технологічним процесом, що знайшов широке застосування в різних сферах промисловості, зокрема в автомобільній, авіаційній, суднобудівній галузях, а також у машинобудуванні загального профілю. Суть технології лазерного різання полягає в тому, що вузьконаправлений пучок лазерного випромінювання концентрується у пляму на поверхні металу або поблизу неї, внаслідок чого метал цієї ділянки нагріву через вплив потужного джерела енергії розплавляється або випаровується. Додатково до лазерного випромінювання в зону обробки подається струмінь технологічного (асистуючого) газу, у ролі якого може бути кисень, стиснене повітря, азот. Цей струмінь газу механічно усуває залишки продуктів руйнування з розрізу. При використанні кисню в зоні обробки процес руйнування доповнюється екзотермічною реакцією горіння металу, що додатково підсилює тепловий ефект та сприяє ефективнішому розрізанню. Цей метод має назву газолазерного різання (ГЛР).

Широкий діапазон товщин металів, які можуть бути розрізані цим способом, та висока якість і точність крайок різу робить цей метод одним із провідних серед сучасних способів металообробки. Тому подальше всебічне вивчення процесу ГЛР є актуальною проблемою.

Постановка проблеми. У процесі газолазерного різання металів використовуються лазерні випромінювачі різного типу, які відрізняються за принципом дії та параметрами випромінювання. Ключовими характеристиками лазерного променя є його потужність і довжина хвилі. На сьогодні для виконання лазерного різання все більше застосовують випромінювання з потужністю в діапазоні до 20 кВт. Таку значну потужність можуть генерувати волоконні лазери, випромінювання яких на довжині хвилі 1,06 – 1,08 мкм досить задовільно поглинається металами, що сприяє застосуванню таких лазерів для ГЛР. Крім того, волоконні лазери мають досить високий ККД – до 30-40 %, та ці лазери майже не потребують експлуатаційних затрат (крім, затрат на електроенергію).

© М. В. Романенко, О. Д. Кагляк, В. В. Романенко, 2025

Для здійснення лазерного розрізання сталевих листів необхідно створити спеціалізований лазерний технологічний комплекс (ЛТК), який може функціонувати як автономно, так і як частина великої виробничої системи. Щоб повною мірою використати переваги лазерної технології різання металів, такі як висока швидкість обробки, точність, локалізована дія теплового джерела на зону різу, а також для гарантування безпеки, надійної роботи, тривалого терміну служби та зниження потреб в обслуговуванні, ЛТК повинен бути максимально автоматизованим. У разі інтеграції ЛТК у структуру складніших виробничих систем його доцільно також роботизувати [1].

До складу автоматизованого ЛТК входять ключові елементи: сам лазерний генератор, система доставки й фокусування лазерного променя (лазерна головка), стіл із можливістю переміщення заготовки по двох координатах X і Y, технологічний лазерний пост та система автоматичного керування. Є і третя, установча координата фокусної відстані Z. Якщо ж головка забезпечена автоматичним контролем фокусної відстані, то переміщення по останній координаті відбувається і в процесі різання [2]. При цьому постає проблема: як найбільш ефективно використовувати потужне лазерне випромінювання для розрізання металевих листів із різних сталей та різних їх товщин, щоб забезпечити більш широке впровадження технології ГЛР у різних галузях машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Маловуглецеві сталі широко використовуються при отриманні різних деталей в процесі виготовлення різноманітних машин та приладів. Розглянемо ключові технологічні чинники, що визначають ефективність ГЛР цих сталей за допомогою потужного лазерного випромінювання.

Насамперед нас цікавитиме товщина листового металу, що підлягає розрізанню. Головною метою є забезпечення наскрізного різу заготовки заданої товщини з досягненням потрібної якості крайок різів. При цьому застосування волоконних лазерів потужністю у 20 кВт відкриває можливості для різання таких сталей товщиною до 80 мм при забезпеченні стабільної якості різів.

Різна товщина сталей вимагає індивідуального підбору параметрів режиму ГЛР. З літературних джерел відомо [3; 4], що для тонких сталей (від 1 до 5 мм) характерні високі швидкості різання та невеликий тиск кисню, що дозволяє запобігти перегріванню і термічному викривленню отриманих деталей. У випадку різання сталей товщиною від 10 до 40 мм необхідно досягти оптимального співвідношення між потужністю лазера і швидкістю різання, щоб гарантувати отримання якісного та точного різу. При різанні ж сталевих листів великих товщин (від 40 до 80 мм) потрібно використовувати високі потужності випромінювання, застосовуючи різке зменшення швидкості різання, щоб забезпечити якісне наскрізне прорізання листової сталі. Виконані іншими авторами дослідження вказують на те, що застосування волоконних лазерів потужністю до 20 кВт відкриває можливості для різання сталей завтовшки до 80 мм при забезпеченні стабільної якості отриманого різу [5; 6].

Останнім часом велика кількість наукових праць присвячена оптимізації технологічних режимів ГЛР для отримання необхідної точності та якості виконаних різів за допомогою потужного лазерного випромінювання [7–10]. Крім того, у багатьох роботах описуються різноманітні технічні рішення та пристрої, спрямовані на підвищення ефективності процесу газолазерного різання [11–13]. Також активно проводяться дослідження з візуалізації й моніторингу фізичних явищ у зоні різання з використанням високошвидкісних відеокамер [14–16]. Значну увагу приділяють також питанням вибору складу та тиску технологічного газу, що подається у зону різання [17; 18]. Зазвичай збільшення тиску асистуючого газу сприяє підвищенню швидкості обробки, однак може також призвести до зростання витрат на експлуатацію. Для маловуглецевих сталей характерні такі типові діапазони тиску (з урахуванням вартості застосовуваних газів): кисень – у межах 0,05 – 0,6 МПа; азот або стиснене повітря – 1,0…2,0 МПа.

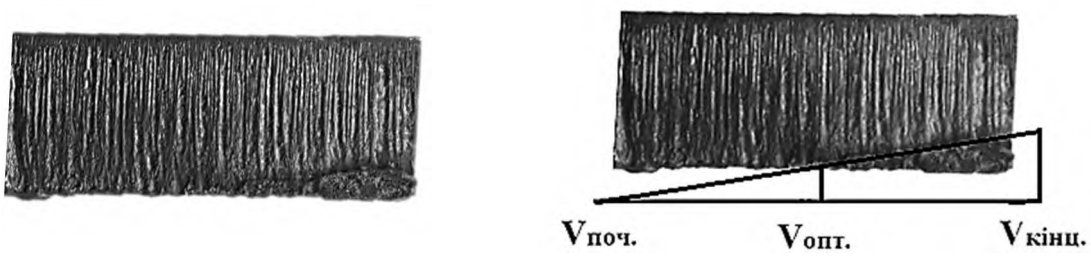
Важливу роль також відіграє довжина фокусної відстані оптичної системи лазера, а також правильне налаштування положення плями фокусування відносно верхньої поверхні оброблюваної заготовки. Зазвичай фокусну пляму зміщують на більшу або меншу величину вглиб різу. У таких умовах необхідно точно підібрати тиск кисню, щоб запобігти виникненню турбулентних потоків газу всередині каналу різу [3–4].

З урахуванням наведеного вище можна зробити висновок, що, попри велику кількість проведених досліджень, тема ГЛР сталевих листів, зокрема листів маловуглецевих сталей, все ще потребує подальших досліджень у питаннях встановлення оптимальних режимів різання заготовок різних діапазонів товщин випромінюванням у 20 кВт.

Мета дослідження. Метою виконаного нами дослідження є визначення впливу різних параметрів процесу ГЛР на вибір оптимального значення швидкості різання маловуглецевих сталей різної товщини. Це дозволить забезпечити вибір відповідних умов розфокусування лазерного променя, а також правильне визначення типу та тиску технологічного газу, що дасть можливість отримати високу продуктивність ГЛР при забезпеченні достатньої якості крайок виконаних різів.

Викладення основного матеріалу. Всі попередньо виконані дослідження вказують на те, що задовільну якість поверхні різу можна забезпечити при виконанні різання на максимально допустимій швидкості, при якій ще можливе наскрізне прорізання металевих листів заданої товщини. Таку швидкість доцільно вважати оптимальною та позначати як *Vопт*. У роботі [19] була запропонована методика поступової ступінчастої зміни швидкості різання. При цьому швидкість ступінчасто збільшувалась так, щоб зрештою отримати неповний проріз матеріалу заданої товщини. При цьому останнє значення отримання наскрізного різу і вважалося оптимальною швидкістю різання заготовки потрібної товщини.

Нами запропонована інша методика пошуку оптимального значення швидкості різання заготовки конкретної товщини. Враховуючи нові широкі можливості реалізації режимів різання за допомогою сучасного обладнання, було запропоновано розрізати заготовку зі змінною швидкістю: починаючи з мінімального значення, яке забезпечує повне прорізання матеріалу, і поступово та безперервно підвищуючи її до того моменту, коли наскрізне різання вже не відбувається. Швидкість, при якій прорізання перестає бути наскрізним, і вважається оптимальним значенням *Vопт*. для цієї товщини заготовки. На рис. 1 наведено алгоритм визначення оптимальної швидкості різання при ГЛР заготовки певної товщини.



а *б*

Рис. 1. Запропонована методика визначення оптимальної швидкості ГЛР сталі:
а – заготовка, на якій виконувалась різка зі змінною швидкістю;
б – ця ж заготовка з графіком зміни швидкості ГЛР

Усі наведені в цій статті дослідження здійснювалися згідно із запропонованим нами підходом, тому отримані значення швидкості різання завжди були оптимальними для конкретної товщини маловуглецевої сталі та забезпечували стабільне наскрізне прорізання заготовки.

При проведенні експериментальних досліджень передусім зверталася увага на вибір умов опромінення заготовок. Навіть з урахуванням того, що при ГЛР коефіцієнт поглинання випромінювання в зоні руйнування становить від 30 до 70 %, при використанні лазерного випромінювання потужністю у 20 кВт густина потужності W_P у зоні фокусування може досягати значної величини в $5 \cdot 10^7$ Вт/см². Такі високі рівні W_P забезпечують у зоні дії сфокусованого променя температуру, що перевищує температуру випаровування сталі. При цьому час дії лазерного випромінювання на матеріал, який визначається тривалістю проходження променем відстані, що дорівнює діаметру фокусної плями D_F зі швидкістю різання V, є дуже коротким. Це безпосередньо впливає на глибину прорізу, тобто на максимальну товщину заготовок, що розрізаються. Також варто зазначити, що ефективне різання маловуглецевих сталей можливе навіть за значно нижчих рівнів густини потужності – наприклад, при W_P, що дорівнює $5 \cdot 10^5$ Вт/см². Таке різання теж дає якісний результат.

Саме тому одним із ключових параметрів при різанні сталей потужним лазерним випромінюванням на рівні в 20 кВт є величина та напрямок розфокусування лазерного променя. У системах з потужними лазерами зазвичай використовують стандартну фокусуючу головку, яка забезпечує співвісну подачу лазерному випромінюванню технологічного газу в зону різання та дозволяє налаштовувати як напрям розфокусування, так і його точну величину на виході з різального сопла. Ці налаштування можуть виконуватись як вручну, так і в автоматизованому режимі [2].

Залежно від вибраного значення розфокусування ΔF змінюється діаметр фокусної плями D_F на поверхні оброблюваної сталі, що, в свою чергу, впливає на густину потужності в зоні різання. У табл. 1 наведено залежність діаметра плями фокусування та густини потужності (з урахуванням коефіцієнта поглинання 0,7) від різних ступенів розфокусування ΔF. Як вже прийнято в лазерній техніці, будемо вважати, що зміщення фокуса у бік фокусувальної лінзи є «позитивним» і позначатимемо його знаком «+» перед значенням ΔF. Відповідно, зміщення фокусної точки вглиб заготовки вважатимемо «негативним» напрямком і позначатимемо знаком «−».

Таблиця 1 − Залежність діаметра плями фокусування та густини потужності лазерного випромінювання від величини розфокусування

Параметри, D_F та W_P	Величина, ΔF, мм								
	0	±2	± 3	±4	±6	±8	±10	±12	±14
Діаметр розфокусування, D_F, мм	0,2	0,33	0,50	0,66	1,00	1,33	1,67	2,0	2,34
Густини потужності, W_P, Вт/см²	$4{,}5 \times 10^7$	$1{,}6 \times 10^7$	$7{,}2 \times 10^6$	$4{,}0 \times 10^6$	$1{,}8 \times 10^6$	10^6	$6{,}5 \times 10^5$	$4{,}3 \times 10^5$	$3{,}3 \times 10^5$

Проте розфокусування лазерного променю не лише знижує густину потужності, але й безпосередньо впливає на тривалість дії випромінювання в зоні різання. Цей час t_p визначається як відношення діаметра світлової плями, що залежить від ступеня розфокусування, до швидкості різання, тобто: $t_p = D_F/V$. Очевидно, що зі збільшенням часу t_p зростає й товщина металу, яку можна прорізати. Але ж зі збільшенням величини плями розфокусування зменшується і густина потужності в зоні різання, що своєю чергою веде до зменшення швидкості прорізання вглиб різу. Тобто при значному розфокусуванні може настати такий момент, коли різання взагалі стає неможливим.

Згідно з теорією руйнування при ГЛР [20], швидкість руйнування V_P, що протікає від верхньої поверхні в глибину металу для потужного випромінювання складає 10-30 м/хв, що і забезпечує розрізання досить великої товщини заготовок. При цьому товщина прорізання H може бути розрахована, як $H = VP \cdot tP$. З іншого боку, як наведено вище, $t_p = DF / V$. Отже, отримуємо просту залежність для визначення швидкості різання − $V = (VP \cdot DF) / H$. Оскільки діаметр розфокусування DF безпосередньо залежить від ступеня розфокусування ΔF, то останній буде досить значно впливати на взаємозалежність товщини сталі та швидкості

її розрізання потужним лазерним випромінюванням. Користуючись наведеними міркуваннями та даними табл. 1, розраховано теоретичну залежність можливої швидкості різання сталі від її товщини при середньому значенні швидкості руйнування (V_P = 20 м/хв) для різних умов розфокусування (рис. 2).

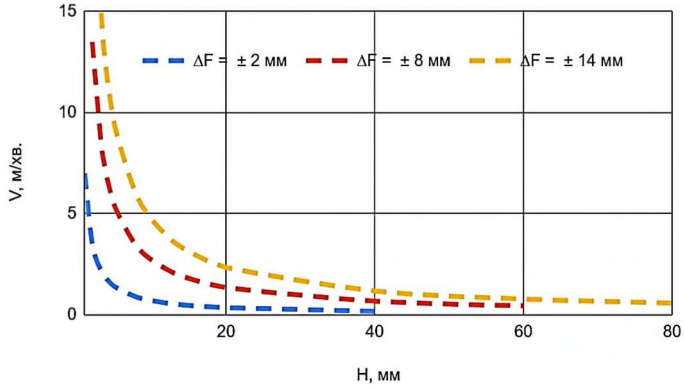


Рис. 2. Теоретична залежність швидкості різання від товщини заготовки за різних умов розфокусування лазерного випромінювання

Отже, теоретичне прогнозування показує, що при ГЛР маловуглецевих сталей потужним лазерним випромінюванням в умовах великих значень розфокусування (± 14 мм) можливим є розрізання заготовок товщиною до 80 мм.

Проведені надалі експериментальні дослідження внесли деякі корегування в теоретичні прогнози. Так, було встановлено, що існують помітні відмінності в особливостях ГЛР маловуглецевих сталей залежно від товщини заготовки. Для тонких листів (5…20 мм), середньої товщини (20-45 мм) та значних товщин (45…80 мм) мають місце відмінності в режимах різання. Зокрема, при розрізанні тонких сталей із використанням азоту або стисненого повітря як технологічного газу досягається набагато вища швидкість їх різання, ніж при застосуванні кисню, інколи в декілька разів. Враховуючи також, що застосування стисненого повітря є доступнішим та економічно вигіднішим у порівнянні з азотом, а результати щодо швидкості різання є майже однаковими, то серію експериментів було проведено саме з подачею стисненого повітря з високим тиском в 1,5…2,0 МПа.

Натомість якщо проводити різання киснем на таких самих швидкостях, то в зоні різу утворюються оксиди й шлаки, які складно видаляються з каналу різу за умов помірного тиску газу (0,15…0,2 МПа). Підвищення ж тиску кисню до рівня, що застосовується для стисненого повітря (1,5…2,0 МПа), є технічно ускладненим і суттєво дорожчим.

Різання металів великої товщини із застосуванням нейтральних газів (зокрема стисненого повітря) є неможливим, оскільки при знижених швидкостях, характерних для такого процесу різання, одного лише лазерного випромінювання недостатньо для підтримки процесу руйнування в зоні різу, а вагому частку в загальному тепловому балансі починає займати теплова енергія, що виділяється внаслідок екзотермічного окиснення металу в кисневому середовищі [20].

Експериментальні дослідження засвідчили також, що як величина, так і напрям зміщення фокусної площини відносно поверхні сталевого листа впливають на товщину металу. Так, для сталевих заготовок завтовшки від 5 до 20 мм оптимальними умовами розфокусування є заглиблення фокуса вглиб різу на величину від 0 до -8 мм. У цьому діапазоні спостерігається така закономірність: кожне збільшення товщини матеріалу на 2 мм вимагає зміщення фокуса вглиб заготовки на додаткові -1 мм.

Для середніх товщин (від 20 до 45 мм) величина ΔF залежно від збільшення товщини заготовки змінюється інакше: на кожні 5 мм приросту товщини потрібно поглиблювати фокус на кожні -1 мм. У цьому випадку сумарний діапазон фокусного заглиблення становить від -10 до -14 мм.

У випадку ГЛР металів завтовшки 45-80 мм ефективніші результати досягаються при розміщенні фокуса вище заготовки: на +13 мм для товщин 45-60 мм і на +14 мм – для товщин 60-80 мм.

На рис. 3, *а* показано, як змінюється максимальна швидкість різання маловуглецевої сталі залежно від товщини заготовки в межах малих значень товщини (5-20 мм). Різання здійснювалося з використанням стисненого повітря під тиском 0,8-1,0 МПа, при цьому фокус зміщувався в глибину різу в межах від 0 до -8 мм залежно від товщини заготовки згідно з наведеним вище правилом.

Залежність оптимальної швидкості різання від товщини заготовки для середніх значень товщин представлена на рис. 3, *б*. Як технологічний газ для цього діапазону товщин застосовувався кисень з величиною тиску від 0,1 до 0,16 МПа. Різання відбувалося при заглибленні фокусу з дотриманням встановлених вище умов розфокусування, тобто коли заглиблення фокусної точки становило від -10 до -14 мм.

Також були визначені оптимальні швидкості різання для товщин металу від 15 до 80 мм у середовищі кисню за умови поступового підвищення тиску кисню від 0,07 до 0,18 МПа пропорційно зростання товщини заготовки та при розміщенні точки фокуса вище заготовки згідно з описаними раніше умовами (рис. 3, *в*).

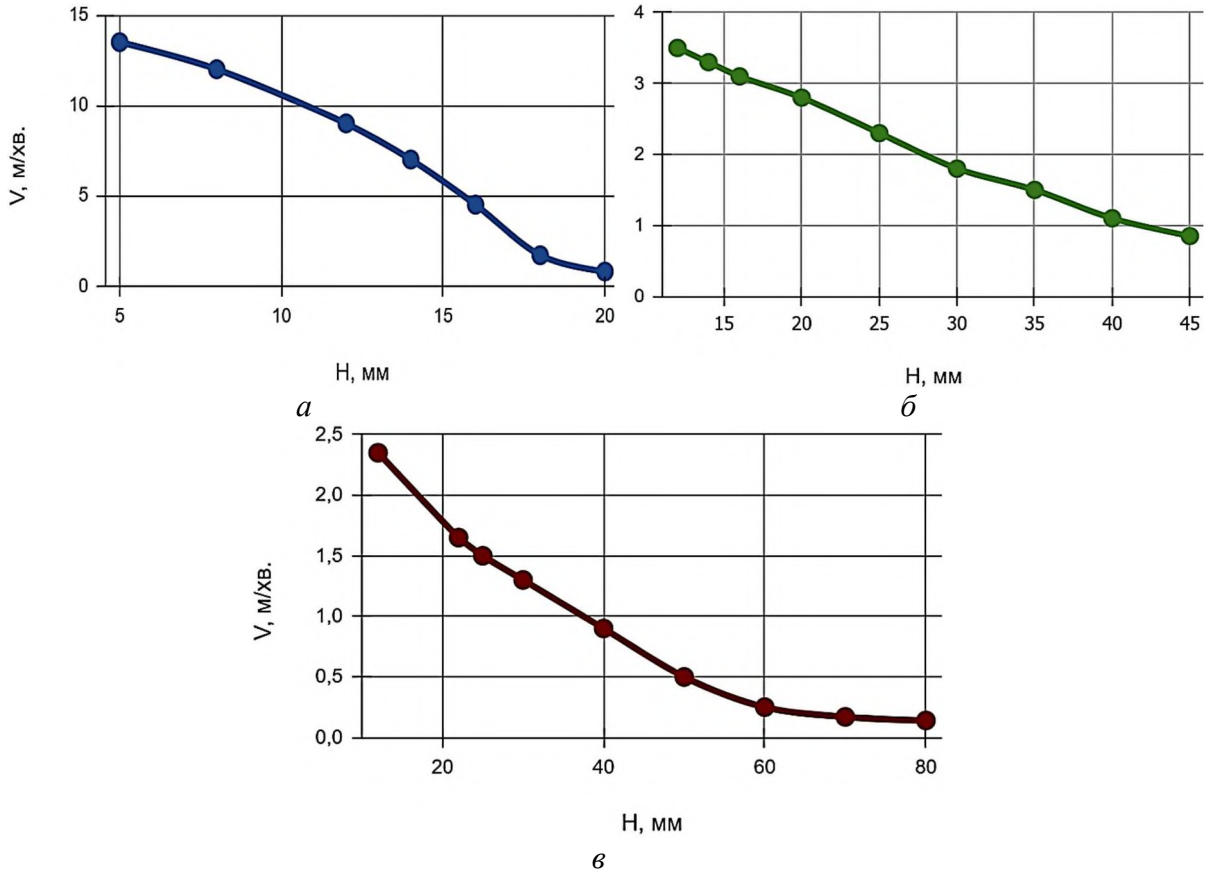
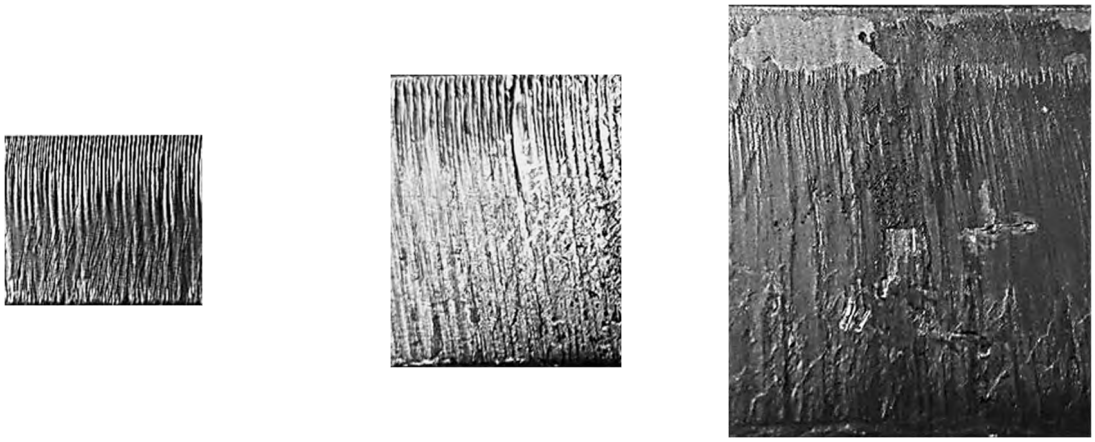


Рис. 3. Залежність швидкості різання маловуглецевих сталей від товщини заготовки для різних діапазонів товщин при застосуванні різноманітних технологічних газів та при різних умовах розфокусування лазерного випромінювання: а – для незначних товщин заготовки (5…20 мм); б – для середніх значень товщин (15…45 мм); в – для великих товщин заготовок (15…80 мм)

Вигляд поверхонь різів при ГЛР маловуглецевої сталі в заготовках товщиною 18, 40 та 65 мм при відповідних оптимальних умовах різання представлений на рис. 4.



а *б* *в*

Рис. 4. Фото поверхонь різів у маловуглецевих сталей при встановлених оптимальних умовах різання заготовки завтовшки 18 мм (а); 40 мм (б); 65 мм (в)

З метою формування загальних рекомендацій щодо вибору параметрів різання маловуглецевих сталей результати, отримані для окремих груп (рис. 3, *а*, *б* та *в*), були об'єднані на одному графіку (рис. 5). Аналіз цього узагальненого графіка підтверджує раніше зроблений висновок, що застосування стисненого повітря з високим тиском при обробці тонких заготовок забезпечує суттєве підвищення швидкості різання (крива графіка для 1-го режиму) порівняно із використанням кисню при низькому тиску (2-й режим). Так, із зображеного на рис. 5 сумарного графіка видно, що для сталей товщиною 5, 10 та 15 мм маємо збільшення швидкості при використанні стисненого повітря щодо кисню відповідно в 3,4, 2,6 та 1,4 раза.

Крім того, варто зазначити, що при обробці сталей середньої товщини лазерне різання на режимах із заглибленням точки фокуса променя вглиб від верхньої поверхні (крива графіка для 2-го режиму) забезпечує деяке збільшення швидкості порівняно з режимом, де фокус розташовується вище поверхні заготовки (3-й режим). Зокрема, для товщин 20, 30 і 40 мм швидкість різання при 2-му режимі перевищувала відповідні значення для 3-го режиму на 23, 12 та 6 % відповідно. Ось чому для обробки сталей середньої товщини доцільніше застосовувати 2-й режим, який є більш ефективним. Водночас, як видно з рис. 5, зі зростанням товщини заготовки швидкість різання у 2-му режимі помітно знижується, що обмежує його ефективність при великих товщинах. Натомість 3-й режим забезпечує можливість різання сталей товщиною аж до 80 мм.

Наведена на рис. 5 пунктирна крива теоретичної залежності можливої швидкості різання сталі від її товщини для величини розфокусування $\Delta F = \pm 14$ показує відповідність прогнозованого характеру протікання процесу ГЛР щодо експериментальних результатів. Разом з тим, оптимальний експериментальний вибір режимів різання забезпечує збільшення товщини сталей, що розрізаються, для діапазону їхніх товщин від 5 до 20 мм проти теоретично розрахованих результатів ГЛР.

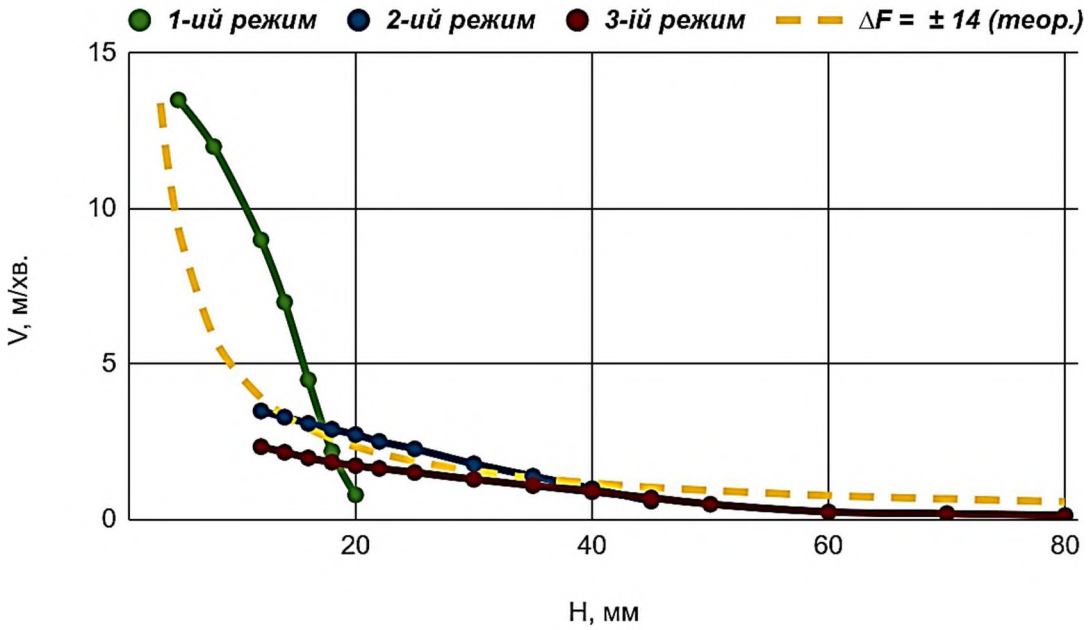


Рис. 5. Експериментально отримані та теоретично розраховані значення швидкості різання маловуглецевих сталей залежно від товщини заготовки у процесі реалізації запропонованих оптимальних режимів різання

Ґрунтуючись на даних, поданих на рис. 5, нами була розроблена номограма (рис. 6), яка дає змогу визначити гранично допустимі швидкості лазерного різання маловуглецевих сталей різної товщини при потужності випромінювання у 20 кВт. Водночас варто зазначити, що процес ГЛР для сталей заданої товщини можливий не лише на граничних швидкостях, які позначені кривою на номограмі, але й у межах усього діапазону швидкостей, що охоплює відповідна кольорова зона.

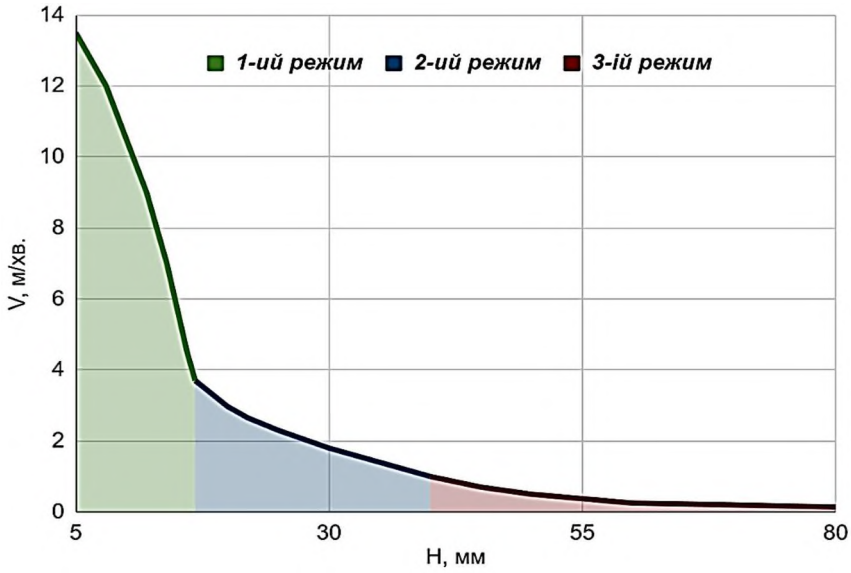


Рис. 6. Номограма для визначення оптимальної швидкості ГЛР маловуглецевих сталей заданої товщини лазерним випромінюванням потужністю у 20 кВт

Використовуючи номограму, обов'язково слід враховувати рекомендації щодо призначення потрібних умов різання, що зведені в табл. 2. Ця таблиця застосовується разом з номограмою для зручності визначення оптимальної швидкості ГЛР маловуглецевих сталей різної товщини потужним лазерним випромінюванням у 20 кВт.

Таблиця 2 – Умови вибору оптимальних режимів ГЛР маловуглецевих сталей

Технологічні параметри різання / Діапазон товщин, мм	Вид та тиск робочого газу		Умови фокусування (розфокусування)		
	Тиск стисненого повітря, МПа	Тиск кисню, МПа	Діапазон величини, мм	Правило розфокусування	
				При збільшенні товщини, мм	Приріст величини розфокусування, мм
5 – 20	0,8 – 1,5	—	0 – -8	2	-1
20 – 45	—	0,1 – 0,1	-10 – -14	5	-1
45 – 80	—	0,07 – 0,18	+13–+14	—	—

Отже, спираючись на залежність оптимальної швидкості лазерного різання маловуглецевих сталей від товщини заготовки, поданої у вигляді номограми на рис. 6, а також враховуючи параметри розфокусування лазерного випромінювання та рекомендовані значення тиску основних робочих газів (кисню або стисненого повітря), наведені в табл. 1, можна визначити найефективніші режими ГЛР для обробки листових заготовок з маловуглецевих сталей в широкому діапазоні товщин від 5 до 80 мм.

Висновки. Використання потужних волоконних лазерів для здійснення ГЛР металів забезпечує ефективне та якісне розділення маловуглецевих сталей у широкому діапазоні їх товщин. Це можливо завдяки варіативності параметрів розфокусування лазерного променя та регулюванню тиску різних видів технологічних газів.

Для досягнення гарантованого наскрізного різу з належною якістю оброблених крайок була запропонована оригінальна методика, яка дає змогу визначати гранично допустимі швидкості різання для заготовок заданої товщини. Ефективність такого підходу підтверджена фото типових різів, зроблених у кожній із груп товщин, що демонструють практичну доцільність і надійність запропонованих рішень у підборі оптимальних режимів різання маловуглецевих сталей.

Одним із ключових чинників при роботі з потужним лазерним випромінювання є вибір параметрів розфокусування лазерного променю – як за величиною, так і за напрямком. Завдяки розробленим умовам розфокусування стало можливим впорядкувати вибір раціональних режимів газолазерного різання для широкого діапазону товщин маловуглецевих сталей. Отримані залежності між товщиною заготовки та оптимальною швидкістю різання свідчать про можливість, з одного боку, здійснювати різання тонколистових маловуглецевих сталей на високих швидкостях до 15 м/хв при використанні як робочий газ стисненого повітря, а з іншого – забезпечувати різання масивних заготовок товщиною до 80 мм із застосуванням кисню.

Сформульовано узагальнені рекомендації щодо вибору режимів різання маловуглецевих сталей завдяки об’єднанню даних усіх груп заготовок різної товщини на одному графіку, що значно спрощують процес визначення оптимальних параметрів ГЛР. Розроблено номограму та таблицю рекомендацій для призначення потрібних умов різання, що дозволяє швидко та зручно визначати оптимальні швидкості різання маловуглецевих сталей потрібної товщини в діапазоні їх товщин від 5 до 80 мм.

У подальшому експериментальні дослідження процесу ГЛР маловуглецевих сталей за допомогою потужного лазерного випромінювання дозволять визначити ті параметри різання, які матимуть вплив на якісні характеристики крайок різів, отриманих таким способом різання.

Список використаних джерел

1. Naresh, S., & Khatak, P. (2022). Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, *56*(5 SI), 24841-24849.

2. QY Laser. (n.d.). *Основні характеристики лазерного верстата для різання*. http://ua.qylaser.com.

3. Tamura, K., & Toyama, S. (2017). Laser cutting performances for thick steel specimens studied by molten metal removal conditions. *Journal of Nuclear Science and Technology*, *54*, 1011-1017.

4. Seon, S., Shin, J. S., Oh, S. Y., Park, H., Chung, C.-M., Kim, T.-S., Lee, L., & Lee, J. (2018). Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Optics & Laser Technology*, *103*, 311-317. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.01.054.

5. Wandera, C., & Kujanpää, V. (2010). Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *Journal of Laser Applications, 22*(2), 62-70. https://doi.org/10.2351/1.3455824.

6. Karatas, C., Keles, O., Uslan, I., & Usta, Y. (2006). *Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation*. *Journal of Materials Processing Technology*, *172*(1), 22–29. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.08.017.

7. Guarino, S., Ponticelli, G. S., & Venettacci, S. (2020). Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 31*, 525-538. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.08.004.

8. Mahrle, A., Borkmann, M., & Pfohl, P. (2021). Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, kerf geometry and cut edge roughness. *Materials, 14*(10), Article 2669. https://doi.org/10.3390/ma14102669.

9. Sharma, A., & Yadava, V. (2018). Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials: A review. *Optics & Laser Technology, 98*, 264-280. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.08.002.

10. Liu, Y., Zhang, S., Zhao, Y., & Ren, Z. (2022). Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. *Optics & Laser Technology, 154*, Article 108332. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332.

11. Rodrigues, G. C., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2018). Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP, 74*, 714-718. https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.026.

12. Pang, H., & Haecker, T. (2020). Laser cutting with annular intensity distribution. *Procedia CIRP, 94*, 48-54. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.050.

13. Yamanashi, T. (2022). Enhancing cutting performance with an oscillating laser beam. PhotonicsViews, 19, 84-86.

14. Levichev, N., Staudt, T., Schmidt, M., & Duflou, J. R. (2021). Hyperspectral imaging and trim-cut visualization of laser cutting. *CIRP Annals – Manufacturing Technology, 70*, 207–210. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2021.04.071.

15. Levichev, N., Costa Rodrigues, G., Vorkov, V., & Duflou, J. R. (2021). Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of thick plates. *Optics & Laser Technology, 136*, Article 106743. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106743.

16. Levichev, N., Tomás García, A., & Duflou, J. R. (2022). On melt flow visualization in high-power fiber laser cutting. *Proceedings of SPIE*, Article 119940D. https://doi.org/10.1117/12.2606543.

17. Chen, S.-L. (1999). The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO2 laser cutting. *Journal of Materials Processing Technology, 88*(1-3), 57-66. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00364-3.

18. Riveiro, A., et al. (2019). Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials, 12*(2), 1–31. https://doi.org/10.3390/ma12020254.

19. Alsaadawy, M., et al. (2024). A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30*, 1039-1074. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11592-7.

20. Romanenko, V. V. (2003). Mechanism of gas-assisted laser metal cutting. In *Laser Technologies in Welding and Materials Processing* (pp. 68–70).

References

1. Naresh S., Khatak P. Laser cutting technique: a literature review. *Mater Today Proc.,* 2022, 56(5 SI), 24841-2489.

2. Osnovni kharakterystyky lazernoho verstata dlia rizannia firmy QY Laser [Main characteristics of QY Laser laser cutting machine]. (n.d.). http://ua.qylaser.com.

3. Tamura, K, Toyama, S. Laser cutting performances for thick steel specimens studied by molten metal removal conditions. *J. Nucl. Sci. Technol.,* 2017, 54, 1011-1017.

4. Seon S., Shin J.S., Oh S.Y., Park H., Chung C.-M., Kim T.-S., Lee L., Lee J. Improvement of cutting performance for thick stainless steel plates by step-like cutting speed increase in high-power fiber laser cutting. *Opt. Laser Technol.*, 2018, 103, 311-317.

5. Wandera C., Kujanpaa V. Characterization of the melt removal rate in laser cutting of thick-section stainless steel. *J. Laser Appl.,*2010, 22, 62-70.

6. Karatas C., Keles O., Uslan I., Usta Y. Laser cutting of steel sheets: Influence of workpiece thickness and beam waist position on kerf size and stria formation. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, 172, 22-29.

7. Guarino S., Ponticelli G.S., Venettacci S. Environmental assessment of selective laser melting compared with laser cutting of 316L stainless steel: A case study for flat washers' production. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2020, 31, 525-538.

8. Mahrle A., Borkmann M., Pfohl P. Factorial analysis of fiber laser fusion cutting of AISI 304 stainless steel: Evaluation of effects on process performance, kerf geometry and cut edge roughness. *Materials,* 2021, 14, Art. 2669.

9. A. Sharma, V. Yadava. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials. *Optics & Laser Technology,* 2018, 98, 264-280.

10. Liu Y., Zhang S., Zhao Y., Ren Z. Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a highpower fiber laser. *Opt Laser Technol,* 2022, 154, Art. 108332.

11. Rodrigues G.C., Vorkov V., Duflou J. Optimal laser beam configurations for laser cutting of metal sheets. *Procedia CIRP,* 2018, 74, 714-718.

12. Pang H, Haecker T. Laser cutting with annular intensity distribution. *Procedia CIRP,* 2020, 94, 48-54.

13. Yamanashi, T. Enhancing cutting performance with an oscillating laser beam. PhotonicsViews, 2022, 19, 84-86.

14. Levichev N, Staudt T, Schmidt M, Duflou JR. Hyperspectral imaging and trim-cut visualization of laser cutting. *CIRP Ann – Manuf Technol.,* 2021, 70, 207-210.

15. Levichev N, Costa Rodrigues G, Vorkov V, Duflou JR. Coaxial camera-based monitoring of fiber laser cutting of thick plates. *Opt Laser Technol.*, 2021, 136, Art. 106743.

16. Levichev N, Tomás García A, Duflou JR. On melt flow visualization in high-power fiber laser cutting. *Proceedings of SPIE,* 2022, Art. 119940D.

17. Chen S.-L. The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO_2 laser cutting. *J. Mater. Process. Technol.,* 1999, 88, 57-66.

18. Riveiro A. et al. Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*,2019, 12, 1-31.

19. Alsaadawy M. et al. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,*2024, 30, 1039-1074.

20. Romanenko V.V. (2003). Mechanism of Gas-Assisted Laser Metal Cutting. *Laser Technologies in Welding and Materials Processing* (pp. 68-70).

Отримано 29.07.2025

UDC 621.375.826:621

Maksym Romanenko[1], Oleksii Kaglyak[2], Victor Romanenko[3]

[1]graduate student of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: romanenkomax.ua@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-8803-2278

[2]PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kaglyak.olexa@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-5602-543X

[3]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Physical Technologies
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: romvvv@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-1918-7090

STUDY OF THE PROCESS OF GAS LASER CUTTING OF LOW-CARBON STEELS WITH A HIGH-POWER LASER

The main drawback of existing studies of gas laser cutting of low-carbon steels of various thicknesses is the lack of a unified methodology for establishing a clear dependency between cutting parameters and the achievement of maximum productivity with proper processing quality. In this regard, this paper analyzes the effect of key factors, in particular the range of

thicknesses of the workpieces being processed, the conditions of focusing and defocusing the laser beam, as well as the type and pressure of the process gas, on the achievement of optimal cutting speeds for low-carbon steel sheets.

The right choice of laser beam defocusing parameters—both in value and direction—is one of the key things when working with powerful laser radiation. Thanks to the accumulated defocusing conditions, it was possible to systemize the selection of effective cutting modes for low-carbon steels and determine the dependence of the optimal cutting speed on the metal thickness for a wide range of these thicknesses. It has also been determined that cutting thin-gauge metals gives better results when using compressed air, while for cutting thick workpieces it is preferable to use oxygen.

The research results made it possible to formulate general recommendations for selecting the optimal gas laser cutting modes for low-carbon steels using 20 kW laser radiation for different workpiece thicknesses. As a result, a nomogram and a table with recommendations for selection of the necessary cutting parameters were created, which complements this nomogram, which together make it possible to set the optimal cutting speeds and significantly facilitate the selection of the relevant technological parameters for gas laser cutting of low-carbon steels within the thickness range from 5 to 80 mm.

Keywords: *laser; gas laser cutting; low carbon steel; optimal cutting speed; conditions for focusing and defocusing laser radiation.*

Fig.: 6. Table: 2. References: 20.

Романенко М. В., Кагляк О. Д., Романенко В. В. Дослідження процесу газолазерної різки маловуглецевих сталей потужним лазером. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 79-90. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-79-90.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-91-100
УДК 621.91.01

Кирило Федорович Хоменко[1], Володимир Олександрович Кучер[2], Олексій Миколайович Осипчук[3], Богдан Валерійович Дзюман[4], Олександр Анатолійович Охріменко[5]

[1]аспірант кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: homenkokirill727@gmail.com

[2]аспірант кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vladimirkucher145@gmail.com

[3]аспірант кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: aleksei.osypchuk@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7865-9484

[4]аспірант кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: dzyumanbogdan@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-5928-4569

[5]доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: alexhobs77@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5446-6987

ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРОФІЛЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ БЕЗ ПРОТУБЕРАНЦЯ З ПРИПУСКОМ ПІД ШЛІФУВАННЯ

У статті розглянуто альтернативний підхід до формування викружки в загартованих зубчастих колесах із використанням черв'ячних фрез без протуберанця для подальшого шліфування. Враховуючи обмеження стандартних фрез і високу вартість інструментів із протуберанцем, у дослідженні запропоновано модифікувати профіль фрези шляхом зменшення кута профілю. У середовищі Scilab розроблено математичну модель процесу формоутворення профілю зуба та проведено порівняльний аналіз варіантів фрез із протуберанцем і без нього (при різних кутах профілю). Результати показали, що зменшення кута профілю фрези дозволяє сформувати придатний для шліфування припуск у зоні ніжки зуба, що спрощує конструкцію інструмента та потенційно знижує витрати на його виготовлення, забезпечуючи при цьому допустимі відхилення евольвентного профілю. Запропонований метод є економічно доцільним рішенням для підвищення довговічності та навантажувальної здатності зубчастих передач.

Ключові слова: *зубчасте колесо; викружка; черв'ячна фреза; протуберанець; профіль зуба; кут профілю; зубофрезерування; припуск під шліфування; оптимізація інструмента; профілювання; математичне моделювання.*

Рис.: 4. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. У сучасному машинобудуванні зубчасті передачі відіграють ключову роль у роботі широкого спектра механізмів, визначаючи їх точність, надійність і довговічність. З розвитком науково-технічного прогресу зростають вимоги до якості виготовлення зубчастих коліс, що зумовлює потребу в удосконаленні методів їх обробки. Однією з критичних зон при цьому є перехідна ділянка у зоні западини зуба, яка зазнає максимальних напружень та є вразливою до утворення тріщин. У промисловій практиці для формування припуску в цій зоні використовуються фрези з протуберанцем, однак така конструкція інструменту є технологічно складною та дорогою. З огляду на це, розробка альтернативного підходу до формування припуску, або викружки шляхом модифікації геометрії профілю фрези без ускладнення її конструкції є актуальним завданням. Особливо перспективним є підхід зі зменшенням кута профілю, який дозволяє формувати припуск у зоні западини без використання протуберанця, знижуючи витрати на інструмент та забезпечуючи придатність до шліфування.

Постановка проблеми. Однією з актуальних проблем при виробництві загартованих зубчастих коліс є недосконала геометрія різальної частини стандартних черв’ячних фрез. Це негативно впливає на точність профілю після фінішної обробки. Зубошліфування, яке виконується як завершальна операція, зазвичай передбачає припуск лише на бічну сторону зуба, тоді як западина та перехідна крива залишаються нешліфованими [1]. Це призводить до утворення нерівностей у зоні ніжки зуба, що спричиняє локальні концентрації напружень, погіршує контактні характеристики і пришвидшує зношування (рис. 1).

© К. Ф. Хоменко, В. О. Кучер, О. М. Осипчук, Б. В. Дзюман, О. А. Охріменко, 2025

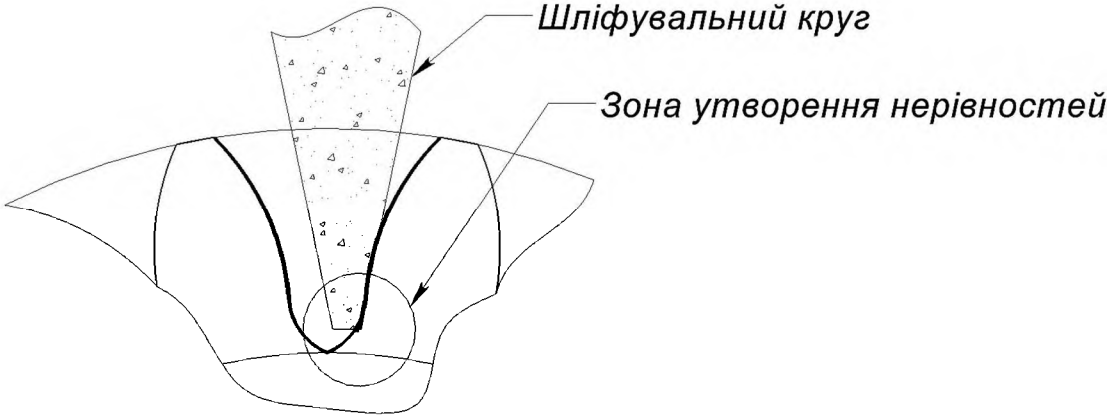


Рис. 1. Профіль зубчастого колеса з утворенням нерівностей після шліфування
Джерело: розроблено авторами.

Для усунення цих недоліків у практиці застосовують черв'ячні фрези з протуберанцем, які формують викружку – спеціальну заокруглену ділянку в ніжці зуба, що забезпечує вільний вихід шліфувального круга (рис. 2). Проте така конструкція фрези суттєво складніша, вимагає високої точності виготовлення та значно збільшує собівартість інструмента.

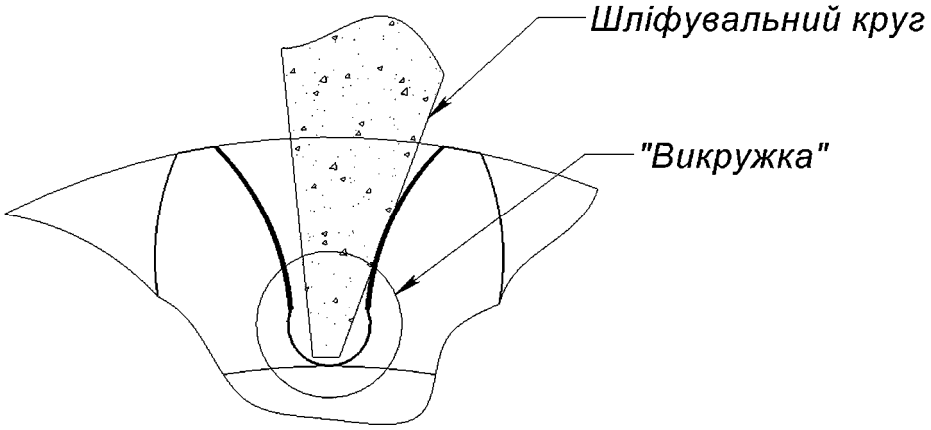


Рис. 2. Профіль зубчастого колеса з викружкою
Джерело: розроблено авторами.

У цій статті запропоновано альтернативний підхід – формування викружки без використання протуберанця шляхом зменшення кута профілю черв'ячної фрези. Такий підхід дозволяє досягти необхідної геометрії перехідної ділянки при істотному спрощенні інструменту. Крім того, збільшення зони контакту фрези із заготовкою сприяє покращенню умов різання, зниженню навантаження на різальну частину та забезпеченню вищої якості поверхні зуба.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес виготовлення загартованих зубчастих коліс включає низку високоточних технологічних операцій, серед яких фінішне зубошліфування відіграє ключову роль. Саме воно визначає остаточну форму профілю, мікрогеометрію та шорсткість, що, у свою чергу, впливає на експлуатаційні характеристики передачі – зносостійкість, навантажувальну здатність, шум, вібрації та КПД. Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють геометрії западини зуба, зокрема формі перехідної кривої в зоні ніжки, яка піддається найбільшим динамічним і згинальним напруженням [1-2].

Як зазначено в [3; 5], навіть незначні відхилення або нерівності в цій зоні можуть призводити до концентрації напружень, ініціації мікротріщин і передчасного руйнування елемента. У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні раціональної викружки – плавного переходу між бічною поверхнею зуба та западиною. Для цього в промисловій практиці використовуються черв'ячні фрези з протуберанцем – додатковим опуклим елементом профілю інструмента, який забезпечує утворення необхідної викружки в зоні ніжки зуба.

Однак інструменти з протуберанцем мають певні обмеження:

- складність профілювання і контролю геометрії;
- недоступність стандартних рішень для фрез збірної конструкції;
- висока собівартість виготовлення, особливо при малій серійності [6].

У зв'язку з цим спостерігається зростання інтересу до альтернативних підходів, які дозволяють забезпечити ту саму функцію – формування викружки – без ускладнення конструкції інструменту. Одним із таких підходів є зворотний геометричний синтез, який передбачає проєктування інструментального профілю, виходячи з бажаної форми поверхні зуба [7].

Сутність підходу полягає в наступному: зважаючи на вимоги до профілю западини (зокрема, наявності плавної викружки), за допомогою інверсного моделювання або чисельного обернення огинаючої поверхні визначається профіль різальної частини фрези. Як показано в [8], зменшення нормального кута профілю інструментальної рейки до значення $\alpha_n = 8°$ дозволяє сформувати «викружку» без додаткових виступів чи протуберанця, оскільки зростає глибина врізання інструмента в зоні перехідної кривої.

Зменшення кута профілю черв'ячної фрези забезпечує низку техніко-технологічних переваг:

- мінімізується контактний кут шліфувального круга при обробці западини;
- покращується зняття стружки та знижується ризик задирів;
- спрощується конструкція інструменту;
- знижується трудомісткість профілювання та вартість виготовлення [9].

У роботах [10, 11] відзначено, що в умовах автоматизованого проєктування інструментів (CAD/CAE системи) зміна кута профілю дозволяє досягти цільової форми перехідної кривої з високою точністю. Особливо ефективним є застосування методів чисельної оптимізації з використанням алгоритмів параметричного синтезу в середовищах типу Scilab, MATLAB тощо. При цьому забезпечується узгодження профілю зуба з процесом шліфування.

Таким чином, наявний стан проблеми свідчить про необхідність пошуку геометричних альтернатив протуберанцю в конструкції інструменту. Постановка задачі дослідження полягає в синтезі оптимізованого профілю черв'ячної фрези зі зменшеним кутом, що забезпечить формування викружки в зоні ніжки зуба без додаткових елементів – при цьому залишаючись технологічно простим і ефективним у роботі.

Метою дослідження є обґрунтування та реалізація альтернативного методу формування викружки в зоні западини зубчастого колеса без застосування протуберанця – шляхом раціональної модифікації профілю черв'ячної фрези. Такий підхід має забезпечити створення припуску, придатного для фінішного шліфування, за рахунок зміни геометрії інструменту, зокрема шляхом зменшення кута профілю вихідної інструментальної рейки.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких основних завдань:

- визначити обмеження і недоліки традиційних конструкцій фрез із протуберанцем при профілюванні западини зуба;
- синтезувати геометрію профілю інструментальної рейки з нормальним кутом профілю $\alpha_n = 8°$ для забезпечення формоутворення викружки без ускладнення конструкції інструменту;

- побудувати математичну модель процесу обкатувального формування профілю зуба, включаючи евольвентну, перехідну та дотичні ділянки профілю;

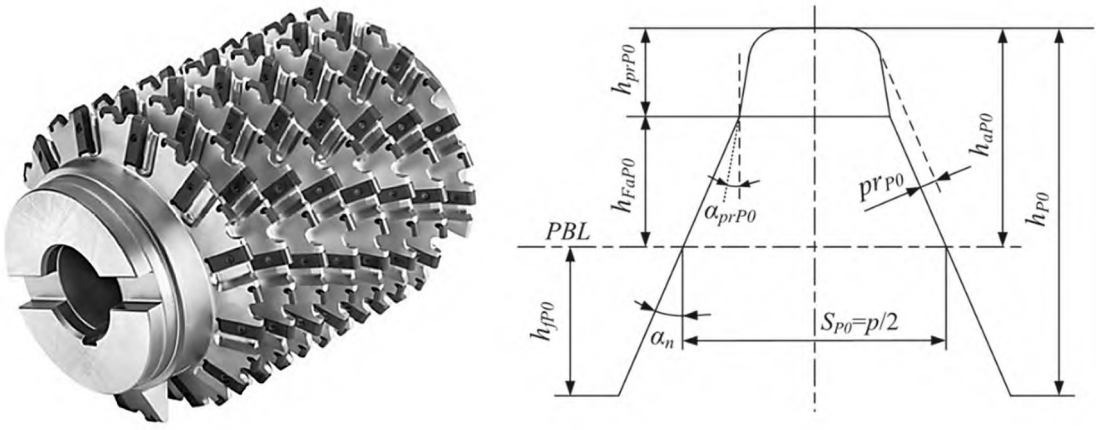
- здійснити моделювання профілю западини в середовищі Scilab на основі параметричних рівнянь і функцій огинаючої поверхні;

- виконати порівняльний аналіз трьох варіантів профілю фрези: з протуберанцем ($\alpha_n = 20°$), без протуберанця ($\alpha_n = 20°$), без протуберанця ($\alpha_n = 8°$);

- оцінити ефективність запропонованого рішення за критеріями плавності перехідної кривої, придатності до шліфування та технологічної простоти виготовлення інструменту.

Вирішення окреслених задач дозволить сформувати геометричні основи для створення інструменту нового типу – без протуберанця, зі зниженою собівартістю та підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення утворення геометрії для виходу шліфувального круга при виробництві загартованих зубчастих коліс застосовують черв'ячні фрези з протуберанцем (рис. 3, *а*). У традиційних конструкціях черв'ячних фрез із протуберанцем (рис. 3, *б*) викружка формується шляхом локального зменшення кута профілю α_{pr} зоні западини. Така конструкція дозволяє утворити плавну перехідну криву між бічною поверхнею зуба та його основою, що забезпечує вихід шліфувального круга.



а *б*

Рис. 3. Традиційна конструкція черв'ячної фрези з протуберанцем:
а – збірна черв'ячна фреза з протуберанцем;
б – інструментальний профіль черв'ячної фрези з протуберанцем

Збірні черв'ячні фрези з протуберанцем мають складну конструкцію, що зумовлює збільшення кількості геометричних елементів різальної частини. Така конструкція ускладнює проєктування, обмежує можливості уніфікації та значно підвищує вартість інструменту.

У роботі досліджено вплив геометрії профілю черв'ячної фрези на формування «викружки» в зоні западини зубчастого колеса. Для цього реалізовано математичну модель формоутворення профілю зуба, що виникає в результаті обкатування інструментального профілю із заданими параметрами.

Синтез геометрії інструментального профілю виконано для трьох варіантів:

- з кутом профілю 20° і наявністю протуберанця;

- з кутом профілю 20° без протуберанця;

- з кутом профілю 8° без протуберанця.

Математичне моделювання процесу обкатування інструментальної рейки, на основі якого формується профіль западини зуба, реалізовано в середовищі Scilab 6.1.1 – відкритому програмному забезпеченні для побудови математичних моделей.

Опис формоутворення профілю зуба здійснюється на основі параметричних рівнянь:
- евольвентної частини профілю;
- перехідної кривої між евольвентною частиною та западиною;
- дуги западини;
- вершинної частини;
- симетричних зображень.

Для побудови профілю використано змінні параметри, що дають змогу легко змінювати геометричні характеристики (кут профілю, кількість зубів, модуль, глибину викружки).

Профілі зуба будуються у вигляді сукупності сегментів, об'єднаних у замкнений контур.

Експорт даних здійснюється у форматі .csv для подальшого використання у CAD-системах або аналітичній обробці. Координати точок профілю розбиваються на три групи: евольвента, перехідна крива та дуга западини.

Аналіз геометрії викружки здійснюється шляхом оцінювання:
- плавності перехідної кривої (безперервність похідних);
- глибини викружки в зоні ніжки зуба;
- наявності перешкод для шліфувального круга;
- відсутності різких змін напрямку або мікроопуклостей;
- придатності профілю до шліфування.

Порівняння трьох варіантів профілю виконується за такими критеріями:
- наявність викружки (якісна оцінка форми западини);
- технологічна складність інструмента;
- потенційна вартість виготовлення;
- відповідність вимогам до шліфування загартованих поверхонь.

Додатково застосовується графічна оцінка результатів: побудова повного зубчастого вінця з 30 зубів через обертання базового профілю на кут 2π/z, що дозволяє візуально проаналізувати повторюваність, симетрію та можливі геометричні конфлікти між сусідніми профілями.

У дослідженні застосовано чисельно-аналітичний підхід до опису геометрії профілю западини зубчастого колеса, який формується внаслідок обкатування вихідним профілем черв'ячної фрези [12]. Математична модель реалізована в середовищі Scilab із використанням параметричних рівнянь та полярних координат.

Модель профілю будується як сукупність таких геометричних ділянок:
- евольвентна частина;
- перехідна крива між боковою поверхнею зуба і западиною;
- дуга западини;
- вершина зуба;
- симетрична частина.

Координати точок евольвентної ділянки описуються у полярній системі:

$$x(u) = r(u) \cdot \sin\varphi\,(u), \quad y(u) = r(u) \cdot \cos\varphi\,(u)\,, \tag{1}$$

де r(u) – поточний радіус;

φ(u) – полярний кут евольвенти, який розраховується за формулою:

$$\varphi(u) = \varphi_0 + \tan\theta\,(u) - \theta(u), \tag{2}$$

де $\theta(u) = \arccos\left(\frac{r_b}{r(u)}\right)$ – радіус базового кола. Значення φ_0 залежить від конструкції інструменту та зміщення профілю.

Перехідна крива між евольвентною ділянкою та западиною задається параметрично:

$$x_P(t) = (X_a + r_d \cdot t) \cdot \cos t - (Y_a + r_d) \cdot \sin t, \tag{3}$$

$$y_P(t) = (X_a + r_d \cdot t) \cdot \sin t + (Y_a + r_d) \cdot \cos t, \tag{4}$$

де X_a, Y_a – координати початкової точки переходу;

r_d – ділильний радіус зубчастого колеса;

t – змінний параметр, що відповідає за положення точки при побудові перехідної кривої.

Граничне значення параметра t, при якому перехідна крива торкається внутрішнього кола западини, визначається розв'язанням рівняння:

$$R_P(t) = \sqrt{x_P^2(t) + y_P^2(t)} - r_f = 0, \quad (5)$$

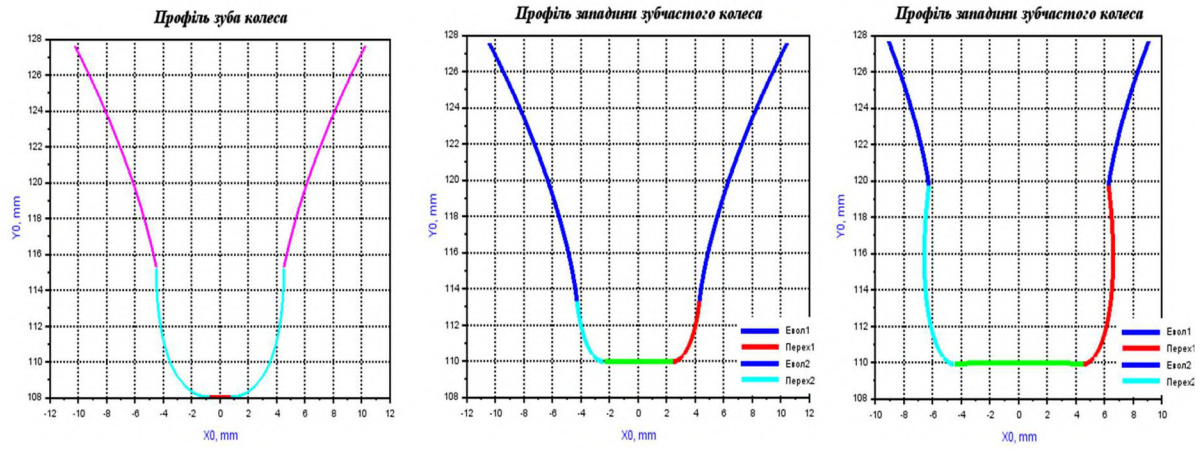
де r_f – радіус западини.

Координати точки дотику евольвентної та перехідної кривих визначаються як розв'язок системи:

$$\begin{cases} x_P(t) = r \cdot \sin\varphi\,(r) \\ y_P(t) = r \cdot \cos\varphi\,(r) \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 3 представлено результати чисельного моделювання трьох варіантів профілю зуба. Колірні позначення відповідають окремим ділянкам профілю: синім позначено евольвентну частину, червоним – перехідну криву, зеленим – дугу западини. Варіант на рис. 4, *в* демонструє плавний вихід у зоні ніжки без використання протуберанця, що підтверджує доцільність зменшення кута профілю фрези.

У процесі чисельного моделювання профілю западини зубчастого колеса розглянуто три варіанти геометрії інструментального профілю: з протуберанцем та без нього, при кутах профілю $\alpha_n = 20°$ та $\alpha_n = 8°$ відповідно. На основі отриманих координат здійснено побудову графічних зображень профілю зуба в середовищі Scilab. Усі результати подано на рис. 4.



а *б* *в*

Рис. 4. Змодельовані профілі зубів зубчастого колеса:
а – з кутом профілю 20° та протуберанцем; б – з кутом профілю 20° без протуберанця; в – з кутом профілю 8° без протуберанця

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння отриманих профілів дозволяє зробити низку висновків. Варіант із використанням протуберанця ($\alpha_n = 20°$) забезпечує утворення викружки, що забезпечує вільний вихід шліфувального круга, проте вимагає складної геометрії різальної частини фрези. Стандартний профіль без протуберанця ($\alpha_n = 20°$) не формує необхідного припуску в зоні ніжки зуба, що унеможливлює повноцінне шліфування западини. Натомість варіант зі зменшеним кутом профілю ($\alpha_n = 8°$) дає змогу сформувати геометрію, яка забезпечує вихід шліфувального інструмента, навіть попри незначне підрізання евольвентної частини, що залишається в межах допустимих значень.

Окремо виконано порівняння перехідних кривих у зоні ніжки зуба (рис. 5).

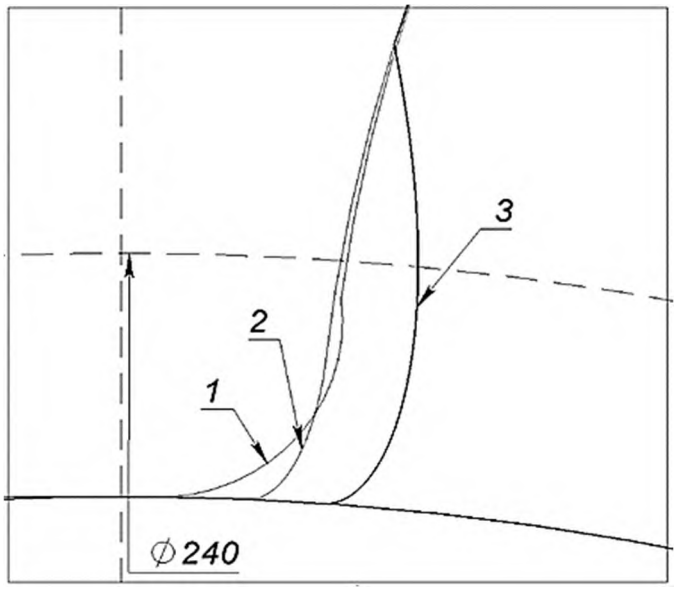


Рис. 5. Порівняння перехідних кривих западини зуба при різних варіантах профілю черв'ячної фрези: 1 – з протуберанцем (α_n = 20°); 2 – без протуберанця (α_n = 20°); 3 – без протуберанця (α_n = 8°)

Джерело: розроблено авторами.

Побудова дає змогу зіставити три варіанти геометрії формоутворення:

1 – профіль із протуберанцем (α_n = 20°);

2 – профіль без протуберанця (α_n = 20°);

3 – профіль без протуберанця (α_n = 8°).

Профіль 3 дозволяє сформувати геометрію западини, яка забезпечує вільний вихід шліфувального круга під час операції шліфування. Це підтверджує доцільність зменшення кута профілю різальної частини черв'ячної фрези для створення припуску, придатного до якісного шліфування без застосування протуберанця.

Висновки. У результаті дослідження доведено, що зменшення кута профілю черв'ячної фрези є ефективним способом формування «викружки» в зоні западини зубчастого колеса без необхідності застосування протуберанця. Це дозволяє спростити конструкцію інструменту та знизити його виробничу складність.

Математичне моделювання процесу формоутворення профілю зуба шляхом обкатування показало, що при зменшенні кута профілю до α_n = 8° формується припуск у зоні ніжки зуба, придатний для подальшого шліфування. Отримана форма відповідає технологічним вимогам, зокрема забезпечує вихід шліфувального круга.

Порівняльний аналіз трьох варіантів геометрії (із протуберанцем при α_n = 20°, без протуберанця при α_n = 20°, без протуберанця при α_n = 8°) підтвердив, що останній варіант забезпечує формування «викружки» без різких змін геометрії зуба, при збереженні допустимих відхилень евольвентної частини.

Запропонований підхід не лише знижує вимоги до точності профілювання фрези, а й дозволяє уникнути підвищених витрат, пов'язаних із виготовленням інструменту з протуберанцем, що є актуальним для серійного та дрібносерійного виробництва.

Результати дослідження можуть бути використані при проєктуванні нових типів збірних черв'ячних фрез для обробки зубчастих коліс, що підлягають загартуванню і, як наслідок, орієнтованих на подальше шліфування для забезпечення довговічності та навантажувальних спроможностей зубчастих передач.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів

У процесі підготовки цієї статті ми (автори) частково використовували інструменти генеративного штучного інтелекту (зокрема, систему ChatGPT, OpenAI, Academic GPT) для редагування текстів, формулювання анотації, перекладу технічних термінів із літературних джерел англійською мовою. Усі отримані результати ретельно перевірені авторами на відповідність змісту дослідження та науковим стандартам. Жодна частина тексту не була згенерована без участі авторів.

Ми підтверджуємо, що вся наукова інформація, включаючи результати моделювання, формули, висновки та зображення, є оригінальною та отриманою безпосередньо у процесі виконання дослідження.

Список використаних джерел

1. Chen, Y., Liu, X., Yang, X., & others. (2023). Investigation on geometrical morphology of tooth surface finished by green high-speed dry hobbing for gear precision machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10, 1141-1154. https://doi.org/10.1007/s40684-022-00459-3.

2. Wang, Y., Xu, H., Shen, H., Wang, G., & Wang, Z. A. (2024). Study on the effect of gear hobbing process parameters on the residual stress of the tooth root. *Applied Sciences, 14*(2), 597. https://doi.org/10.3390/app14020597.

3. Dong, P., Zuo, S., Tenberge, P., Uelpenich, R., Xu, X., Liu, Y., Wang, S., & Lai, J. (2022). Rapid hob tip corner optimization of spur gears for increasing bending strength. *International* Journal of *Mechanical Sciences, 224*, 107322. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107322.

4. Hodgyai, N., Máté, M., Oancea, G., & Dragoi, M.-V. (2024). Gear hobs–cutting tools and manufacturing technologies for spur gears: The state of the art. *Materials*, *17*(13), 3219. https://doi.org/10.3390/ma17133219.

5. He, R., Tenberge, P., Xu, X., Li, H., Uelpenich, R., Dong, P., & Wang, S. (2021). Study on the optimum standard parameters of hob optimization for reducing gear tooth root stress. *Mechanism and Machine Theory*, *156*, 104128. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104128.

6. Karpuschewski, B., Beutner, M., Köchig, M., & Härtling, C. (2017). Influence of the tool profile on the wear behaviour in gear hobbing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, *18*, 128-134. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.002.

7. Kapelevich, A.L., Shekhtman, Y.V. (2019). Optimization of asymmetric tooth root generated with protuberance hob. *Forsch Ingenieurwes 83*, 627-634. https://doi.org/10.1007/s10010-019-00357-2.

8. Mascenik, J., Coranic, T., & Krenicky, T. (2023). Options on tooth profile modification by hob adjustment. *Applied Sciences*, *13*(19), 10646. https://doi.org/10.3390/app131910646.

9. Kühn, F., Löpenhaus, C., Brimmers, J. et al. (2020). Analysis of the influence of the effective angles on the tool wear in gear hobbing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 108*, 2621-2632. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05499-0.

10. Piotrowski, A., & Tyliszczak, A. (2024). Profile optimisation of a solid modular hob in the machining of gears made of classic and unusual, innovative materials. *Materials*, *17*(9), 2049. https://doi.org/10.3390/ma17092049.

11. Ni, H., Yan, C., Ge, W. et al. (2022). Integrated optimization of cutting parameters and hob parameters for energy-conscious gear hobbing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 118*, 1609-1626. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07804-x.

12. Богуслаєв, В., Равська, Н., Качан, О., & Балушок, К. (2007*). Формоутворення черв'ячних зуборізних фрез. Запоріжжя: Мотор Січ*.

References

1. Chen, Y., Liu, X., Yang, X., & others. (2023). Investigation on geometrical morphology of tooth surface finished by green high-speed dry hobbing for gear precision machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, *10*, 1141-1154. https://doi.org/10.1007/s40684-022-00459-3.

2. Wang, Y., Xu, H., Shen, H., Wang, G., & Wang, Z. A. (2024). Study on the effect of gear hobbing process parameters on the residual stress of the tooth root. *Applied Sciences, 14* (2), 597. https://doi.org/10.3390/app14020597.

3. Dong, P., Zuo, S., Tenberge, P., Uelpenich, R., Xu, X., Liu, Y., Wang, S., & Lai, J. (2022). Rapid hob tip corner optimization of spur gears for increasing bending strength. *International* Journal of Mechanical Sciences, *224*, 107322. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107322.

4. Hodgyai, N., Máté, M., Oancea, G., & Dragoi, M.-V. (2024*). Gear hobs–Cutting tools and manufacturing technologies for spur gears: The state of the art. Materials*, *17*(13), 3219. https://doi.org/10.3390/ma17133219.

5. He, R., Tenberge, P., Xu, X., Li, H., Uelpenich, R., Dong, P., & Wang, S. (2021). Study on the optimum standard parameters of hob optimization for reducing gear tooth root stress, *Mechanism and Machine Theory*, *156*, 104128. https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104128.

6. Karpuschewski, B., Beutner, M., Köchig, M., & Härtling, C. (2017) Influence of the tool profile on the wear behaviour in gear hobbing, CIRP *Journal of Manufacturing Science and Technology*, *18*, 128-134. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.002.

7. Kapelevich, A. L., Shekhtman, Y. V. (2019). Optimization of asymmetric tooth root generated with protuberance hob. *Forsch Ingenieurwes, 83*, 627-634. https://doi.org/10.1007/s10010-019-00357-2.

8. Mascenik, J., Coranic, T., & Krenicky, T. (2023). Options on Tooth Profile Modification by Hob Adjustment. Applied Sciences, *13*(19), 10646. https://doi.org/10.3390/app131910646.

9. Kühn, F., Löpenhaus, C., Brimmers, J. et al. (2020). Analysis of the influence of the effective angles on the tool wear in gear hobbing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108*, 2621-2632. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05499-0.

10. Piotrowski, A., & Tyliszczak, A. (2024). Profile Optimisation of a Solid Modular Hob in the Machining of Gears Made of Classic and Unusual, *Innovative Materials. Materials*, *17*(9), 2049. https://doi.org/10.3390/ma17092049.

11. Ni, H., Yan, C., Ge, W. et al. (2022). Integrated optimization of cutting parameters and hob parameters for energy-conscious gear hobbing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 118, 1609-1626. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07804-x.

12. Bohuslaiev, V. O., Ravska, N. S., Kachan, O.ьYa., & Balushok, K. B. (2007). *Formoutvorennia cherv'yachnykh zuboriznykh frez [Formation of worm gear hobs]. Motor Sich*.

Отримано 27.08.2025

UDC 621.91.01

Kyrylo Khomenko[1], Volodymyr Kucher[2], Oleksii Osypchuk[3], Bogdan Dzyuman[4], Oleksandr Okhrimenko[5]

[1]PhD student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: homenkokirill727@gmail.com

[2]PhD student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vladimirkucher145@gmail.com

[3]PhD student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: aleksei.osypchuk@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7865-9484

[4]PhD student of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: dzyumanbogdan@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0008-5928-4569

[3]Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: alexhobs77@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5446-6987

GEAR TOOTH PROFILE FORMING WITH A GRINDING ALLOWANCE USING HOBS WITHOUT PROTUBERANCE

This paper proposes an alternative approach to the formation of a grinding allowance in the root area of gear teeth to ensure clearance for the grinding wheel during the finishing operation, without the use of a protuberance. The proposed method is based on reducing the profile angle of the hob. The relevance of the study lies in the fact that conventional protuberance-type hobs, typically used for forming grinding allowances, have a complex cutting geometry, which significantly increases their

manufacturing cost. Standard hobs with unmodified cutting profiles do not provide sufficient material in the root area for subsequent grinding. Therefore, the development of modified hobs with a reduced profile angle is considered. Replacing protuberance hobs with tools featuring a simplified cutting geometry can reduce production costs and simplify tool design.

The research was conducted using a numerical–analytical simulation of the enveloping process of the tool profile in the Scilab environment. Three variants of rack-type cutting geometry were analyzed: with a 20° profile angle and protuberance, with a 20° angle without protuberance, and with an 8° angle without protuberance. For each variant, the resulting root profile was modeled, including the involute segment, fillet transition curve, and root arc.

The results demonstrate that reducing the profile angle to 8° enables the formation of a geometry suitable for grinding wheel clearance in the root area. At the same time, the cutting profile of the worm hob becomes significantly simpler to manufacture, and the slight trimming of the involute remains within permissible limits. The proposed approach eliminates the need for protuberance-type hobs when forming a grinding allowance. These findings can be applied in the design of new types of composite hobs intended for machining gear wheels that undergo hardening and subsequent grinding.

Keywords: *gear tooth; root fillet; worm hob; protuberance; tooth profile; profile angle; hobbing; grinding allowance; tool optimization; profile synthesis; mathematical modeling.*

Fig.: 4. References: 12.

Хоменко К. Ф., Кучер В. О., Осипчук О. М., Дзюман Б. В., Охріменко О. А. Формоутворення профілю зубчастих коліс черв'ячними фрезами без протуберанця з припуском під шліфування. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 91-100. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-91-100.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-101-108
UDC 621.8

Marek Malik[1], Rudolf Jánoš[2]

[1]PhD student of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)
E-mail: marek.malik@tuke.sk

[2]Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)
E-mail: rudolf.janos@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5754-9278
ResearcherID: AAH-5449-2019. **Scopus Author ID:** 55016528600

ROBOT OPERATING SYSTEM, MIGRATION, GAZEBO, ROS1, ROS2

This article describes the migration of software packages from the Robot Operating System 1 (ROS 1) environment to the new ROS2 architecture, using the JetAuto mobile platform as a case study. The work focuses on the practical migration procedure, identifies problems and their solutions. The jetauto_interfaces and jetauto_driver packages were sequentially migrated and subsequently tested in the Gazebo simulator with ROS2 Humble. Several issues emerged during implementation, such as incorrect model loading in Gazebo, non-functional URIs in XACRO files, and improperly oriented camera images and point clouds. These errors were resolved by a combination of software tools (ros2 topic, image_rotate, tf2_tools) and modifications to URDF files. The result is a fully functional simulation of the JetAuto robot in ROS2, publishing correct sensor data and enabling basic control. In a broader context, the article reflects global trends in ROS2 adoption and highlights the importance of migration for both academic and industrial environments.

Keywords: *Robot Operating System; migration; Gazebo; ROS1; ROS2.*
Fig.: 6. References: 10.

Relevance of the research. The Robot Operating System (ROS) has become the “de facto” standard for academic research and development in robotics. Introduced in 2010, ROS1 has found widespread adoption in academia and startups, providing a unified framework for communication between software components, sensor data processing, and actuator control. With the growing complexity of robotic applications, however, the limits of this architecture became apparent, particularly in the areas of deterministic communication, security, and scalability for large-scale multi-robot systems. These shortcomings led to the development of the second-generation ROS2, which introduced fundamental architectural changes. It uses the Data Distribution Service (DDS) as its communication core, supports Quality of Service (QoS) profiles, provides mechanisms for secure communication, and enables deployment in real-time environments [1]. These features make ROS 2 a suitable platform for both research and industrial applications. The importance of the transition to ROS 2 is further emphasized by the fact that official ROS 1 support ended in 2025. Companies such as OTTO Motors and LG Electronics are deploying ROS2 in autonomous mobile robots [2; 3], while academic institutions are integrating it into research on autonomous vehicles and service robots. In this context, migrating existing projects from ROS 1 to ROS 2 becomes a key challenge. It not only enables the preservation of older solutions but also allows leveraging the modern features of ROS 2. This issue is the subject of this work, which documents the migration of the JetAuto mobile platform from ROS 1 to ROS 2 and analyzes the identified problems and chosen solutions.

Problem statement. Migrating software packages from ROS1 to ROS2 is not a direct conversion. Although both follow the same principles of modularity and publish-subscribe communication, technical differences cause many complications. One of the most important differences lies in the build systems: packages developed in Catkin for ROS1 must be adapted to Colcon for ROS2 [4]. This requires rewriting CMakeLists.txt and package.xml, adjusting dependencies, versions, and libraries.

Another challenge is that many ROS1 packages have no official ROS2 ports. For JetAuto, both jetauto_interfaces and jetauto_driver existed only in ROS 1. Functions such as ros, Publisher and ros, Subscriber were replaced by rclcpp, Publisher and rclcpp, Subscription, and initialization methods had to be modified [5].

© M. Malik, R. Jánoš, 2025

Simulation-level problems also arose. Initial attempts to spawn the robot in Gazebo loaded an incorrect model variant due to conditional inclusions in the jetauto.xacro file. Furthermore, Gazebo failed to load mesh files referenced via package://URIs, requiring manual path adjustments [4].

Analysis of recent research and publications. Scientific papers show that ROS2 offers clear advantages for distributed systems, but latency and performance depend on the DDS (Data Distribution Service) middleware used [6]. Case studies (e.g., Autoware) demonstrate that migrating complex systems requires a modular approach and the use of the ros1_bridge [7]. Practical experience confirms that the most common problems include errors in TF graphs and incorrect QoS (Quality of Service) profile settings, which lead to unreliable message delivery [8]. These experiences align with the problems we encountered in our work – incorrect transformations between camera frames and the point cloud [9].

Sub-objectives of the Research. The primary goal of this work was to design and validate a methodology for migrating ROS1 packages to ROS2 using JetAuto as a test platform. The objectives were not only technical but also methodological, emphasizing that migration requires systematic debugging and validation.

1. **Migration of communication interfaces.** The first objective was to migrate the **jetauto_interfaces** package, which defines messages and services. This step was essential for building the communication layer upon which all other components depend.
2. **Driver migration.** The second objective was the migration of the **jetauto_driver** package, responsible for hardware communication. Porting it to ROS2 required extensive API modifications and represented the most complex part of the process.
3. **Simulation in Gazebo.** The third objective was to launch the robot in the Gazebo simulator as a test environment independent of real hardware. This allowed the identification of errors in model loading, transformations, and sensor data publishing.
4. **Documentation and recommendations.** The final objective was to document the entire migration process, analyze errors, and present solutions applicable to other developers and researchers. Thus, the work provides not only technical results but also methodological contributions in the form of best practices.

Research objective. The primary goal of this work was to migrate selected packages of the JetAuto mobile platform from the ROS1 environment to ROS2 and verify their functionality in simulation. Particular attention was paid to maintaining compatibility with existing robot functions, testing the correctness of sensor data publishing, and identifying the problems that the migration entailed.

The statement of basic materials. For the software platform, ROS2 Humble Hawksbill was chosen. This distribution was selected due to its long-term support (LTS), which is guaranteed until 2027. In addition to stability, Humble also offers broad support for the Gazebo simulator, SLAM Toolbox, and the Nav2 navigation stack, which are key components for the development of autonomous mobile robots [10]. Humble is also the officially recommended distribution for systems with Ubuntu 22.04, which was the test platform for our experiment.

Testing was conducted on an NVIDIA Jetson Orin 4 GB computer unit, chosen for its optimization for robotic applications and hardware acceleration support [11]. This unit was used to compile and run ROS2 packages, providing a realistic environment for practical deployment.

The JetAuto mobile platform is equipped with several sensors that were directly included in the experiments:

- Slamtec A1 LIDAR, providing 2D laser scans for localization and mapping.
- Orbbec FHD-1080P Astra Pro Plus camera, allowing for image capture and point cloud generation for 3D perception of the environment.
- Four-wheel differential drive with motor units, allowing the testing of motion commands in both simulation and a real environment [12].

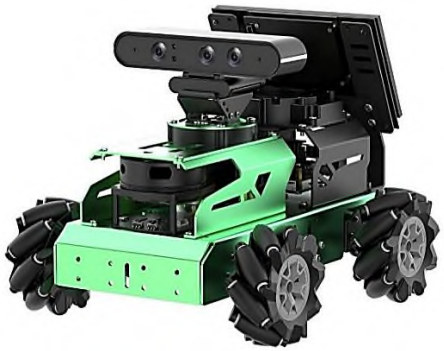


Fig. 1. Jetauto [12]

Work procedure. The migration of the JetAuto mobile platform from ROS1 to ROS2 was carried out step by step. Each stage brought its own set of challenges, which were systematically identified, analyzed, and resolved. This section provides a comprehensive overview of the procedure, serving both as documentation of our work and as a methodological guide for future migrations.

Package migration. The main package to be migrated was identified as a first step. We started with the original JetAuto Simulation project for ROS1. The basic files from this package were gradually taken over, with modifications to CMakeLists.txt and package.xml to make them compatible with Colcon. During the modifications, we also encountered dependencies in the drivers. Some drivers had to be modified or replaced with alternative implementations for ROS 2. It was clear from this stage that migration would not be a mere formal conversion but a complex process requiring interventions in the source code. First, the jetauto_interfaces package, which contains message and service definitions, was migrated. Changes were necessary in CMakeLists.txt and package.xml. Next, the jetauto_driver package was ported. The biggest change was replacing ROS1 API with the ROS 2 API. Errors during the build process had to be resolved by adding dependencies.

First launch of the simulation in Gazebo. During the first attempts to spawn the robot, the wrong model variant was loaded. The problem lay in jetauto.xacro. The solution was to explicitly set the machine, lidar, and depth_camera parameters. Another problem was that Gazebo could not load mesh files via package://. The solution was to set use absolute paths. After successful package compilation, we made our first attempt at a Gazebo simulation. At first glance, the environment appeared empty, but upon closer analysis, we identified that at least some sensors were visualized – especially the LIDAR shown on Fig. 2. RViz2 was also launched, where responses from the basic topics could be displayed.

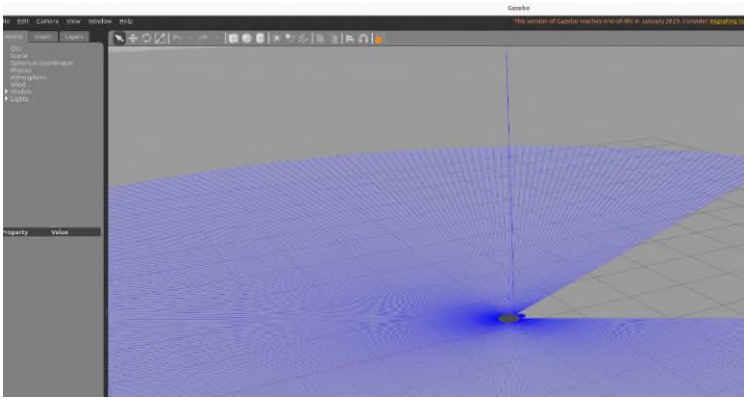


Fig. 2. Robot spawned with missing network files

Source: developed by the author.

URDF and mesh file modifications. The next step was to adapt the robot's definition in the URDF/XACRO files. It was found that several of the robot's properties, such as dimensions and sensors, needed to be redefined to match reality and be correctly interpreted in ROS2. In detecting the problem, we found that the robot did not have a path to the STL files that defined its 3D model. The paths were originally specified in the package://format, which was not recognized by Gazebo in the ROS 2 environment. The problem was solved by modifying the paths and setting the GAZEBO_MODEL_PATH environment variable. Another problem was that after the second launch, the robot spawned in the simulation with an offset of approximately 5 cm above the surface shown on Fig. 3. This error was related to the incorrect setting of the base link in the URDF and was corrected by modifying the offset in the base frame definition.

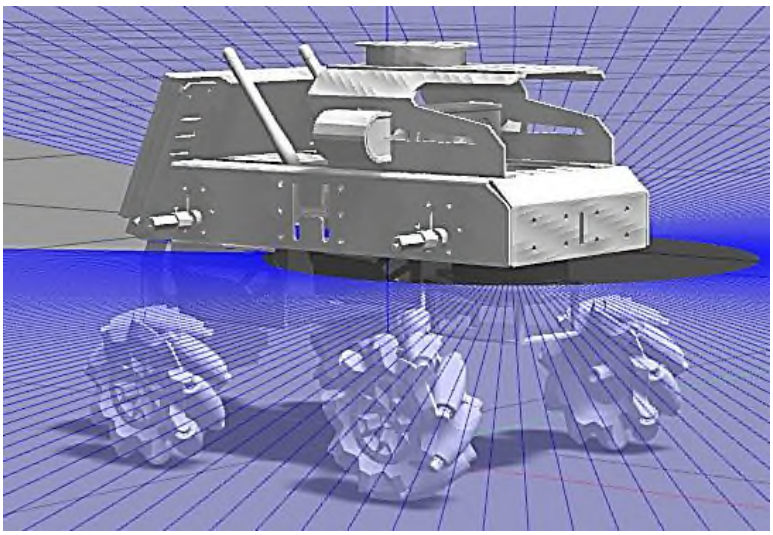


Fig. 3. Robot spawned with missing network files

Source: developed by the author.

Differences between JetAuto versions. Another challenge came from differences between the JetAuto Pro simulation package and the simpler JetAuto hardware configuration shown on Fig. 4. JetAuto Pro includes an arm and additional peripherals, while JetAuto does not. This mismatch caused inconsistencies in the URDF definitions. By exporting the settings and editing the URDF manually, the model was aligned with the actual JetAuto hardware.

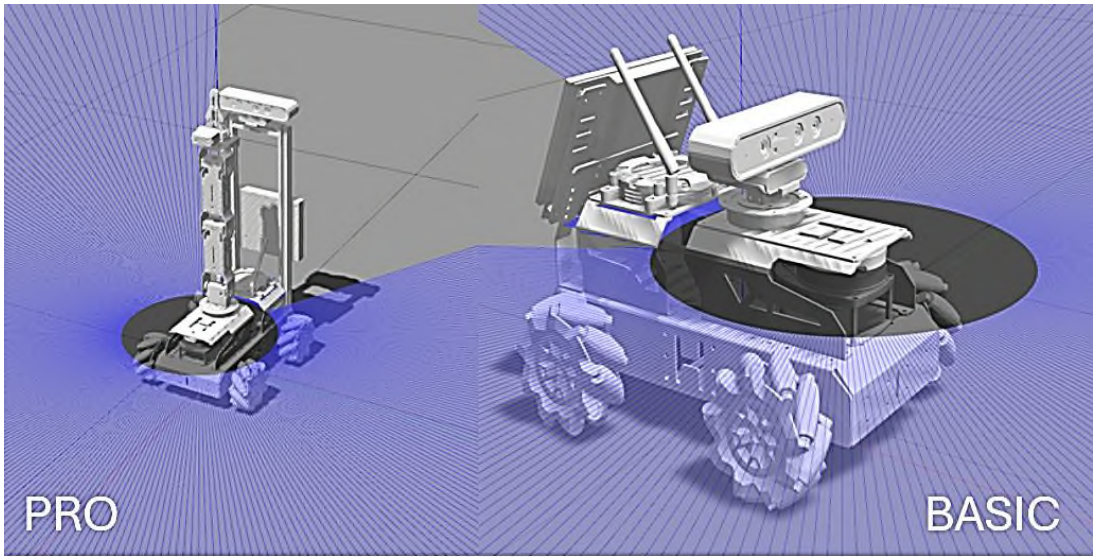


Fig. 4. Comparison of JetAuto Pro and JetAuto in simulation

Source: developed by the author.

Camera and point cloud orientation. One of the most complex issues encountered during the migration was the integration of the depth camera. After replacing the unsupported ROS1 plugin with its ROS2 equivalent, the camera image appeared in RViz2 but was consistently rotated by 180° shown on Figure 5. At first glance, this seemed to be a simple orientation issue that could be solved directly in the URDF description.

Several approaches were attempted:

URDF modifications.

The orientation of the camera link was adjusted multiple times by modifying roll, pitch, and yaw parameters in the camera_link to camera_frame joint. Each adjustment, however, only shifted the problem without solving it: the point cloud remained misaligned relative to the robot's base frame.

Joint type modification.

A second attempt involved changing the definition of joint 2, originally set as a revolute joint, to a fixed joint. This prevented the camera from being virtually "rotated" in simulation. Despite this change, the problem persisted because the underlying TF chain still produced a double rotation between camera_link and camera_frame.

Data validation.

During debugging, the published TF frames were analyzed (ros2 run tf2_tools view_frames). It became evident that the camera frame transformations were inconsistent: even when the URDF was corrected, the resulting visualization showed an image rotated by 180° and a point cloud flipped relative to the environment.

Since structural changes to the URDF did not produce the expected outcome, a software-level solution was chosen. The image_rotate node was introduced into the processing pipeline. This node subscribes to the original camera topic and republishes the image data with corrected orientation.

To ensure consistency between 2D images and 3D point clouds, a new topic called depth_points_optic was created. This topic programmatically rotated the point cloud data derived from the camera, aligning it with the optical frame expected by RViz2 shown on Fig. 6.

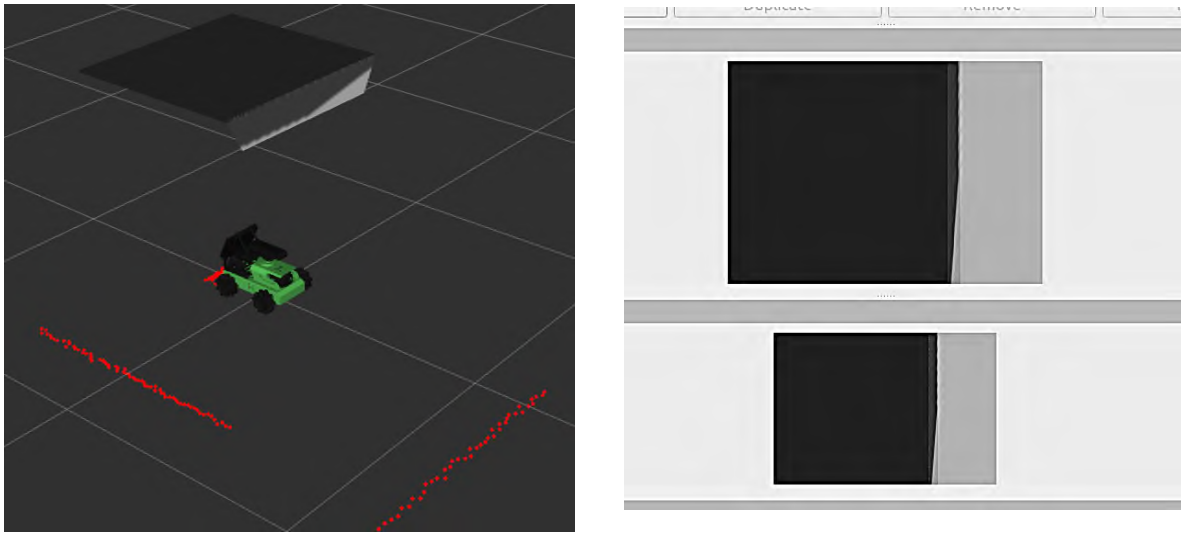


Fig. 5. RViz2 screenshot showing the incorrectly rotated camera image

Source: developed by the author.

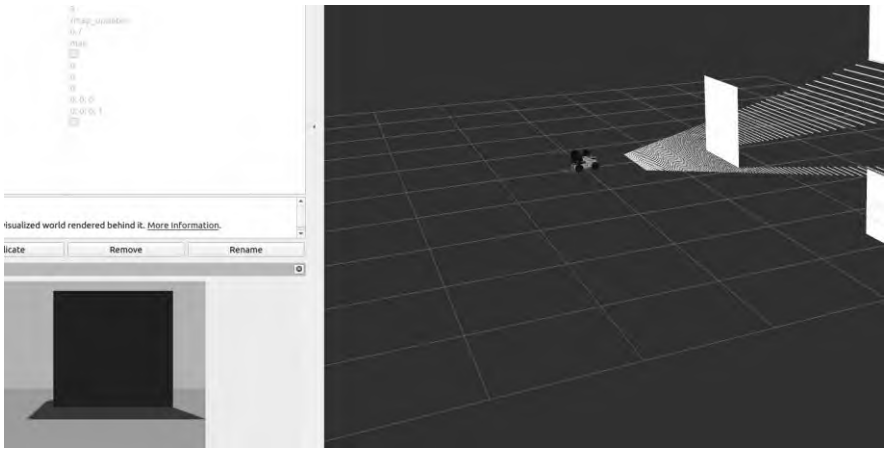


Fig. 6. Correctly oriented image after applying image_rotate and republishing through the new optic topic

Source: developed by the author.

The result was a correctly oriented camera view and point cloud, enabling proper visualization and further use in mapping and navigation.

Final validation. As a final validation step within the procedure, the ROS 2 TF tree was generated and analyzed. The TF tree confirmed that all expected frames–including the base frame, odometry, wheel joints, LIDAR, IMU, and camera frames–were present and connected in a coherent hierarchical structure shown on Fig. 7. This step was crucial to ensure that all transformations were consistent before performing mapping experiments.

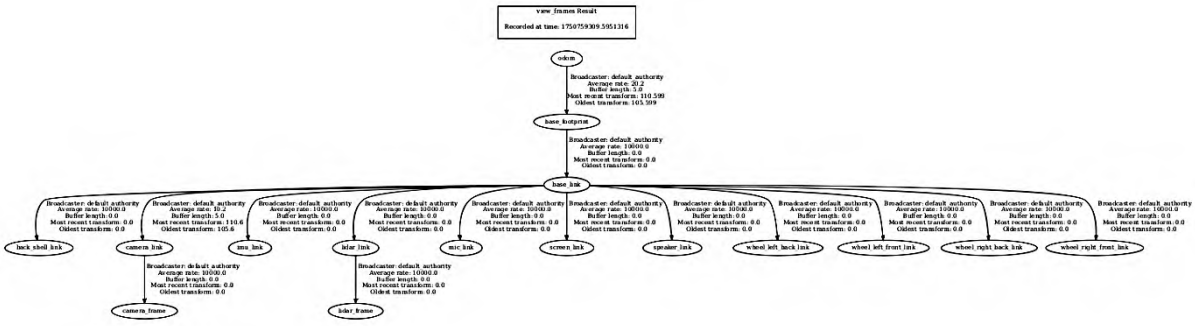


Fig. 7. TF tree of the JetAuto platform in ROS 2 after migration

Source: developed by the author.

Result. The migration process resulted in a fully functional simulation of the JetAuto mobile platform in ROS2. The **jetauto_interfaces** and **jetauto_driver** packages were successfully ported and compiled without errors. The simulation in Gazebo confirmed that the robot spawned correctly after URDF and mesh path modifications. The LIDAR provided accurate scan data, visualized in RViz2.

The differences between JetAuto Pro and JetAuto were resolved, leading to a model that correctly represented the real hardware. The most critical issue, the camera orientation, was successfully addressed using the **image_rotate** package and the introduction of a new topic for the corrected point cloud. This provided a reliable image feed and accurate 3D perception of the environment.

Finally, the TF tree confirmed that all robot components were properly linked, and transformations were correct. The successful SLAM mapping experiment further validated that the migrated packages, sensors, and transformations worked together seamlessly. The generated occupancy grid maps showed clear boundaries and obstacles, confirming the correctness of LIDAR scans and overall system integration.

Conclusions. This work demonstrated the successful migration of the JetAuto mobile platform from the ROS1 environment to ROS2. The migration covered two essential software packages – jetauto_interfaces and jetauto_driver – which were ported, restructured, and validated in simulation. The main technical challenges included adapting the build system from Catkin to Colcon, resolving API differences between ROS1 and ROS2, correcting URDF/XACRO inconsistencies, and ensuring proper integration of sensors in Gazebo.

The most critical issue, the incorrect orientation of the depth camera and its point cloud was solved through a combined hardware–software approach, including URDF modifications and the use of the *image_rotate* node. Similarly, problems with mesh paths and model variants were eliminated by explicit parameterization and environment variable adjustments. Final validation using TF tree analysis and SLAM mapping confirmed that all robot components were correctly integrated and operational in ROS2.

Beyond the technical results, this study highlights that migration from ROS1 to ROS2 is not a direct conversion but a systematic process that requires iterative debugging and validation. The presented methodology and solutions provide practical guidance for researchers and developers facing similar tasks. In a broader context, the work confirms the necessity of migration to ROS2, which is becoming the global standard in both academic and industrial robotics. Future research will extend this work by integrating higher-level navigation (Nav2), SLAM optimization, and real-world validation on the physical JetAuto platform.

Acknowledgements

This research was supported by project VEGA: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

References

1. Maruyama, Y., Kato, S., & Azumi, T. (2016). Exploring the performance of ROS2. In *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software (EMSOFT)*. ACM. https://doi.org/10.1145/2968478.2968502.

2. eProsima. (2021, September 15). *eProsima and Clearpath (OTTO Motors) deploying ROS 2 at scale in production systems*. https://www.eprosima.com/news/eprosima-and-clearpath-deploying-ros-2-at-scale-in-production-systems.

3. Lee, Y., Kim, H., Park, J., & Choi, S. (2021). Development of ROS2-on-Yocto-based thin client robot and edge server interworking system. *Journal of Korea Robotics Society*. https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO202109065716450.page.

4. Open Robotics. (2022). *Migrating from ROS 1 to ROS 2 – How-to guide*. In *ROS 2 Humble documentation*. https://docs.ros.org/en/humble/How-To-Guides/Migrating-from-ROS1.html.

5. Black Coffee Robotics. (2022). *ROS 1 to ROS 2 Migration: A Comprehensive Guide*. https://www.blackcoffeerobotics.com/blog/ros-1-to-ros-2-migration.

6. White, R., et al. (2020). *Evaluation of the ROS2 middleware for real-time robotic applications*. arXiv preprint arXiv:2005.02541. https://arxiv.org/abs/2005.02541.

7. Autoware Foundation. (2022). *Autoware ROS 2 migration notes*. https://autowarefoundation.gitlab.io/autoware.auto/AutowareAuto/architecture/migration/.

8. Ekumen Labs. (2022). *Migrating from ROS 1 to ROS 2: what you need to know*. https://ekumenlabs.com/blog/posts/migrating-from-ros1-to-ros2/.

9. ROS 2 image_pipeline package. (2022). *image_rotate Node Documentation*. https://github.com/ros-perception/image_pipeline/tree/ros2/image_rotate.

10. Open Robotics. (2022). *ROS 2 Humble Hawksbill documentation*. https://docs.ros.org/en/humble/.

11. NVIDIA. (2023). *Jetson Orin Nano developer kit* [Product page]. https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-orin.

12. *Hiwonder JetAuto AI Robot Kit – NVIDIA Jetson-Powered ROS1/ROS2 Educat*. (n.d.). Hiwonder. https://www.hiwonder.com/products/jetauto?variant=41201592434775.

Отримано 19.09.2025

УДК 621.8

Марек Малік[1], Рудольф Янош[2]

[1]аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки
E-mail: marek.malik@tuke.sk
[2]доцент, доцент кафедри виробничих систем та робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)
E-mail: rudolf.janos@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5754-9278
ResearcherID: AAH-5449-2019. **Scopus Author ID:** 55016528600

РОБОТОТЕХНІЧНА ОПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА, МІГРАЦІЯ, GAZEBO, ROS1, ROS2

У цій статті описано міграцію програмних пакетів із середовища Robot Operating System 1 (ROS 1) до нової архітектури ROS2 на прикладі мобільної платформи JetAuto. Робота зосереджена на практичній процедурі міграції, визначає проблеми та їх вирішення. Пакети jetauto_interfaces і jetauto_driver були послідовно перенесені і згодом протестовані в симуляторі Gazebo з ROS2 Humble. Під час реалізації виникло кілька проблем, таких як неправильне завантаження моделі в Gazebo, нефункціональні URI в файлах XACRO, а також неправильно орієнтовані зображення камери та хмари точок. Ці помилки були вирішені за допомогою комбінації програмних інструментів (ros2 topic, image_rotate, tf2_tools) та модифікацій файлів URDF. Результатом є повністю функціональна симуляція робота JetAuto в ROS2, яка публікує правильні дані датчиків і забезпечує базове управління. У ширшому контексті стаття відображає глобальні тенденції у впровадженні ROS2 і підкреслює важливість міграції як для академічного, так і для промислового середовища.

Ключові слова: *робототехнічна операційна система; міграція; Gazebo; ROS1; ROS2.*

Рис.: 6. Бібл.: 10.

Malik, M., Jánoš, R. (2025). Robot operating system, migration, gazebo, ROS1, ROS.2. *Технічні науки та технології*, (3(41)), 101-108. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-101-108.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-109-114
UDC 621.8

Kristian Takac[1], Jan Semjo[2], Patrik Pilat[3]

[1]PhD student of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)
E-mail: kristan.takac@student.tuke.sk

[2]Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)
E-mail: jan.semjon@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9076-7808
ResearcherID: AAH-6272-2019. **Scopus Author ID:** 55571411200

[3]PhD student of the Department of Production Systems and Robotics
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)
E-mail: patrik.pilat@tuke.sk

COMPARISON OF VIRTUAL COMMISSIONING SYSTEMS: EKS VS ISG VIRTUOS

This article presents a comparative analysis of two leading platforms for virtual commissioning and digital twin development in industrial automation: EKS and ISG virtuos. Drawing on recent project experiences and technical documentation, the article evaluates both systems in terms of simulation capabilities, integration workflows, scalability, and practical deployment in automotive and manufacturing environments.

Keywords: *virtual commissioning; digital twin; EKS; ISG virtuos; industrial automation; simulation.*
Fig.: 4. Table: 2. References: 5.

Relevance of the research. The rise of digital twins and virtual commissioning has transformed how manufacturers design, test, and deploy automation solutions [1]. Platforms such as EKS and ISG Virtuos enable engineers to validate control logic, simulate robot paths, and optimize production lines before physical installation, reducing costs and accelerating time-to-market.

Problem statement. Modern production facilities require robust tools for early-stage validation and emulation of complex automation systems. The challenge lies in selecting a platform that balances simulation depth, integration flexibility, and deployment efficiency. This article compares EKS and ISG Virtuos, focusing on their strengths and limitations in real-world digital twin and virtual commissioning projects. In systems where production stations operate with cycle times as low as 1 second or less, the simulation must process a large number of events, signals, and part movements within extremely short timeframes.

Analysis of recent research and publications. Both EKS and ISG Virtuos have been adopted by major OEMs, including VW, BMW, Audi, GM, and Daimler, for virtual commissioning and digital twin workflows. EKS is recognized for its streamlined setup, unified licensing, and seamless integration with CAD and PLC environments. ISG Virtuos excels in multi-zone simulation, variant handling, and deep modelling capabilities, supporting large-scale deployments across multiple plants.

Uninvestigated parts of a common problem. This leads to:

- High computational load due to the simultaneous handling of many production parts.
- Increased simulation tick time, which can cause delays in signal exchange between the virtual PLC/controller and the simulated environment.
- Risk of desynchronization, where the simulation lags behind the real-world timing, potentially invalidating test results or causing false positives/negatives in error detection.

If the simulation cannot maintain a processing time that is equal to or faster than the real system's cycle time, it introduces latency that would not exist in the physical system. For example:

- A station with a 1-second cycle time expects signal feedback and actuation within milliseconds.
- If the simulation takes 200-300 ms to process a tick, the delay could distort the behaviour of the control logic.

© K. Takac, Ja. Semjo, P. Pilat, 2025

• This can lead to incorrect validation, missed synchronization points, or unrealistic performance assumptions.

Research objective. The goal of this research is to provide a structured comparison of EKS and ISG Virtuos, highlighting their respective approaches to simulation, integration, scalability and the ability to handle large amount of production parts.

The statement of basic materials. EKS – The platform serves as a core component of digital plant solutions by enabling early software debugging and virtual integration, offering real-time emulation and interface testing across PLCs, robots, and MES systems. It supports fast deployment with minimal dependency on physical components through a unified licensing model and facilitates operator and maintenance training via integrated VR/AR modules [2].

ISG – The platform is simulation-centric, designed for adding kinematic layer, robotic modelling, and multi-zone virtual commissioning setups, and supports multi-core processing, 2D/3D modelling, variant handling, and cycle time analysis. Deployment typically requires dedicated license sets and significant labour hours for setup and testing [3]. Table 1 shows a comparison of EKS and ISC Virtuos.

Table 1 – Comparative Table

	EKS	ISG Virtuos
Simulation Focus	Real-time emulation, interface testing	Deep modelling, multi-zone simulation
CAD	Integrated with mechanical design tools	Extensive kinematic and robotic setup
Variant Handling	Supported via digital twin workflows	Detailed modelling of product variants
Licensing	Unified	Dedicated license sets
Deployment Speed	Fast, minimal physical dependencies	Labor-intensive setup and testing
Training Support	VR/AR modules for operators	VR training
Best Fit	Fast VC deployment, integration testing	Complex simulation, multi-plant modelling

Table 2 – Used hardware and software

Component	Specification
CPU	AMD Ryzen Threadripper 3970X, 32 cores, 64 threads, 3.70 GHz base
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3090, 24 GB dedicated memory, DirectX 12
RAM	128 GB DDR4, 3200 MHz

Software	Version
RF::YAMS	v25.1.4.541 (Build Date: 2025.09.04), Plugin: rfAssistances v25.1.4.539
ISG Virtuos	v3.7.14.85896 (Release Date: 2025.09.16), Compatible with TwinCAT v3.1.4024.25 and v3.1.4024.55

The simulation was executed on a single, high-performance simulation workstation equipped with multi-core processing and advanced GPU capabilities. The research workflow followed a structured sequence, beginning with the creation of a production part using Process Simulate. The part, Fig. 1 was modelled with dimensions of 100 × 100 × 10 mm, chosen to reflect realistic components used in the automotive industry. Specifically, this part represented a battery cell, a common element in electric vehicle manufacturing.

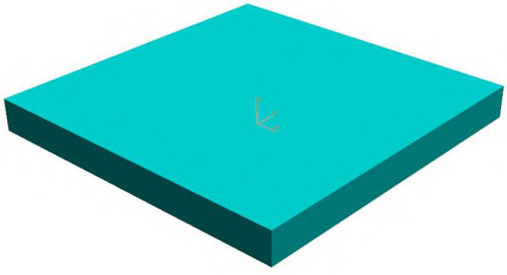


Fig. 1. Production part

Once the part was modelled, a set of reference frames was created within Process Simulate. These frames served as positional anchors and were essential for the subsequent integration into RF::YAMS, where they would be used to instantiate parts dynamically during the simulation. The complete study, including the part geometry and frame definitions, was exported as a PSZX file. This file format includes both the simulation layout and the associated library components, ensuring compatibility with downstream tools. The exported PSZX file was then imported into a new, empty project in RF::YAMS. Using the built-in YAMS assistance tools, the simulation environment was configured to support material flow logic [4]. This involved assigning the production part to the previously defined frames, configuring input signals for each frame to enable part creation, and setting up deletion signals to remove parts once their lifecycle was complete, Fig.2. These signals were critical for emulating realistic production behaviour, such as part loading, processing, and unloading.

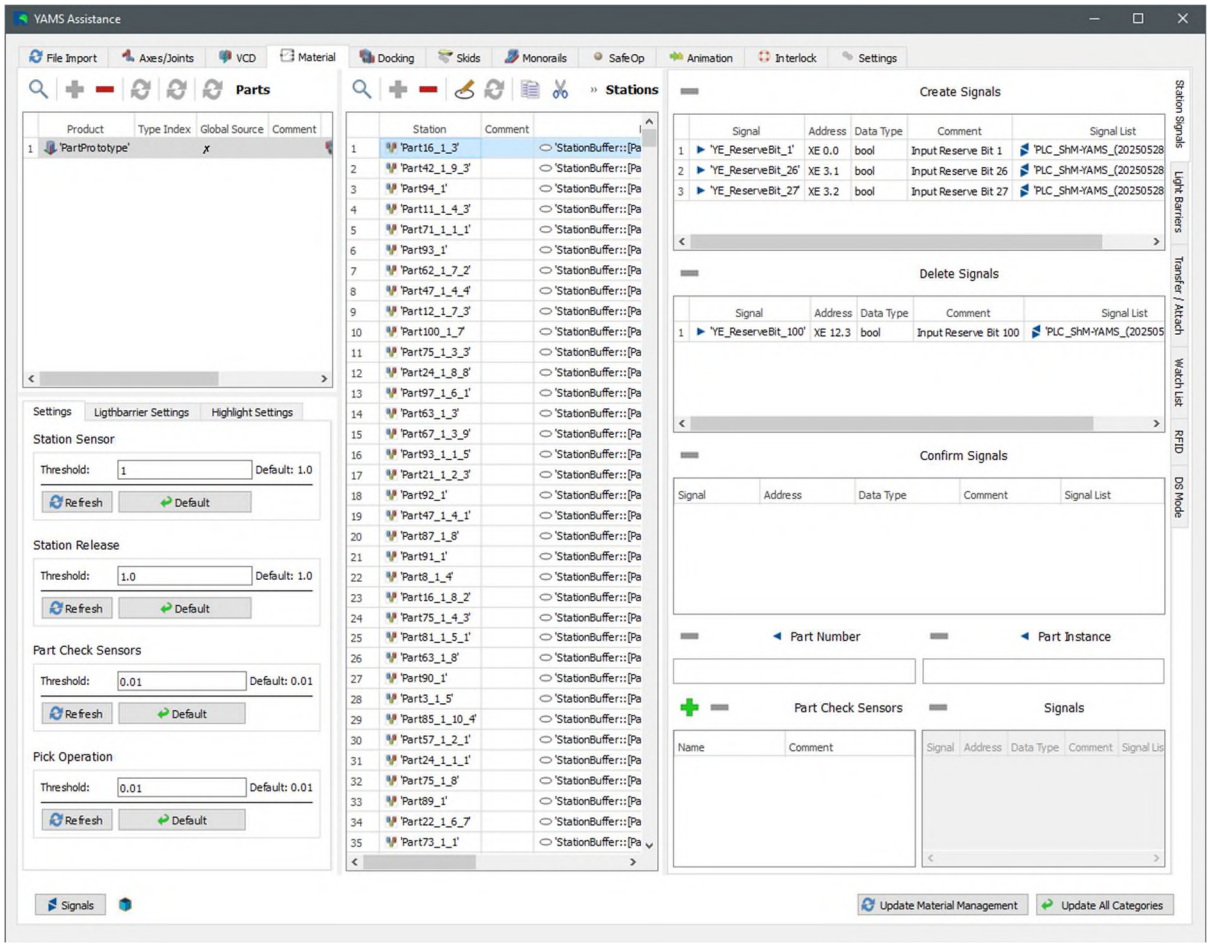


Fig. 2. YAMS assistance

Following the initial configuration, baseline performance measurements were taken with the simulation in an idle state, meaning no parts were present in the system. This provided a reference point for evaluating system load and responsiveness. The first simulation trigger was then activated, initiating the creation of a batch of 100 parts. These parts were instantiated at the designated frames. To assess scalability and system performance under increasing load, additional batches of 100 parts were introduced in successive iterations. After each batch was added, system behaviour and processing time were monitored. This process continued until the total number of parts in the simulation reached 1000, simulating a high-volume production scenario typical of automotive assembly lines. The experiment provided valuable insights into

how the simulation platform handles large-scale part creation, signal exchange timing, and resource management under realistic operating conditions (Fig. 3).

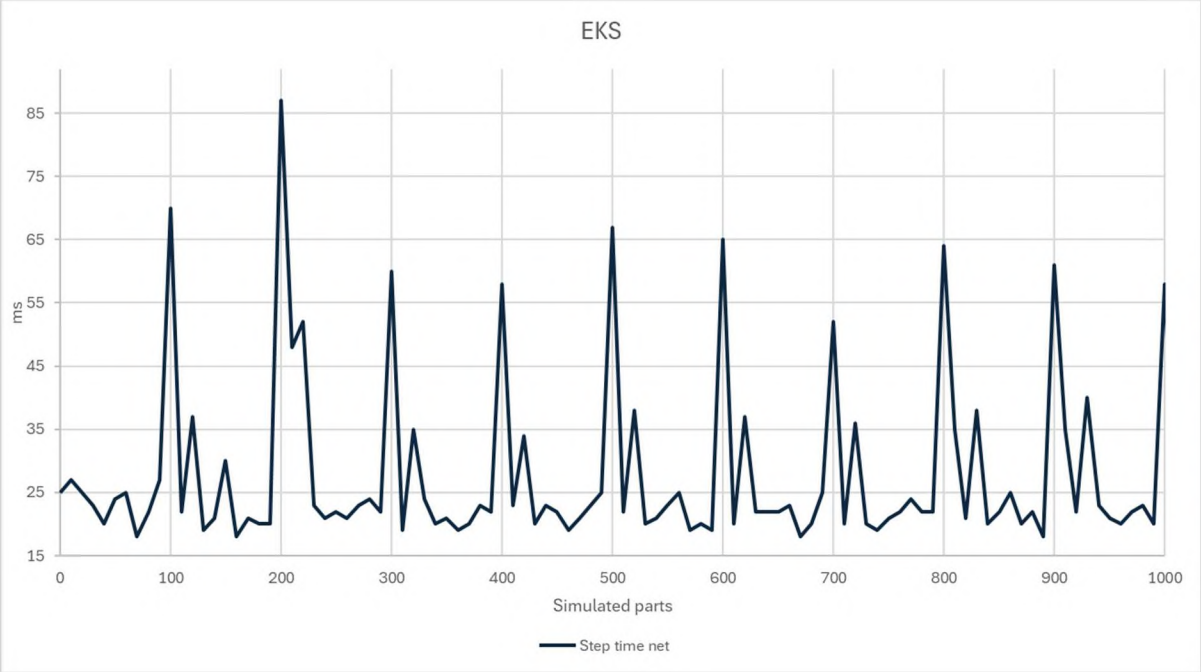


Fig. 3. EKS step time

The simulation workflow using ISG Virtuos followed a structured approach designed to maintain consistency with the baseline established in the EKS simulation. To ensure comparability, the same production part model created in Process Simulate [5]. This ensured that both simulations operated under the same conditions. The CAD geometry of the part was imported into ISG's 3D Creator module, where it was defined as a casing object. This step allowed the part to be visualized and manipulated within the ISG simulation environment. To simulate the introduction of production parts into the system, material sources were created and configured. These sources acted as generators, capable of instantiating parts dynamically during runtime. Within the World section of ISG, a storage line was added to serve as a physical platform for the parts. This line provided spatial structure and acted as a staging area for part placement and movement. To enable control over part creation, a control panel was added to the block diagram. This panel was configured to send trigger signals to the material sources, initiating the creation of parts on demand. The output from the control panel was connected to the load input of each material source, establishing a direct signal path for part generation. Once the simulation environment was fully configured, performance measurements were conducted using the same methodology as in the EKS-based simulation. Initial readings were taken with the system in an idle state, with no parts present. Then, a trigger signal was sent to generate the first batch of 100 parts, followed by successive batches in increments of 100, until a total of 1000 parts were present in the simulation (Fig. 4). This approach enabled a direct comparison of system behaviour, responsiveness, and scalability between the ISG and EKS platforms under identical load conditions.

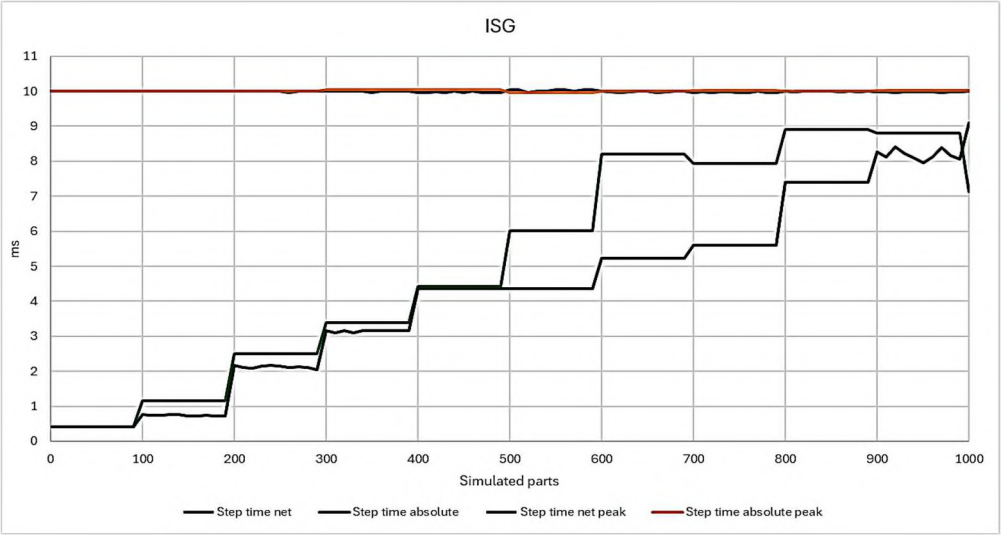


Fig. 4. ISG step time

Conclusions. The study revealed significant differences in simulation cycle time performance between the EKS and ISG platforms under varying load conditions. In the EKS environment, the baseline cycle time during idle operation and when no parts were being created ranged 18-25ms. However, when introducing parts, the cycle time increased substantially, peaking at 85m. The amount of production parts present in the simulation had no effect on the cycle time. This indicates a notable sensitivity to part creation, with performance degradation as the system load increased. In contrast, the ISG platform demonstrated significantly more efficient cycle time behaviour. The idle cycle time with no parts present was consistently below 1ms. After introducing the first batch of 100 parts, the cycle time rose to 1ms, and continued to increase gradually with each additional batch. At the maximum load of 1000 parts, the simulation maintained a cycle time of just 9ms. These results highlight ISG's superior scalability and responsiveness in high-volume, low-cycle-time production scenarios, making it a more suitable choice for complex digital twin and virtual commissioning applications where timing precision is critical. Both EKS and ISG Virtuos offer robust solutions for virtual commissioning and digital twin development. EKS stands out for its rapid deployment, integration efficiency, and training support, making it ideal for projects prioritizing speed and operational readiness. ISG Virtuos, with its advanced simulation capabilities and scalability, is better suited for complex, variant-heavy environments requiring deep modelling and multi-zone coordination.

Acknowledgements

This article was created thanks to the VEGA project support: 1/0215/23 Research and development of robotic workplaces equipped with industrial and collaborative robots.

References

1. Daniel, A., Sriramulu, S., Partheeban, N., Jayagopalan, S. (2024). Digital Twin Technology and Applications ISBN 978103243059.

2. EKS. Virtual commissinong software. https://www.eks-intec.com/services/digital-factory/virtual-commissioning/.

3. ISG-Virtous. Virtual commissinong software. www.isg-stuttgart.de/en/products/softwareproducts/isg-virtuos.

4. FEE. Digital Twin Software. https://www.fescreen-sim.de/fescreen-sim/digitaler-zwilling-software.

5. Siemens. Robotics programming and simulation TECNOMATIX. https://plm.sw.siemens.com/en-US/tecnomatix/robotics-programming-simulation/.

Отримано 19.09.2025

УДК 621.8

Крістіан Такач[1], Джон Семен[2], Патрік Пілат[3]

[1]аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)
E-mail: kristian.takac@student.tuke.sk

[2]доцент, доцент кафедри виробничих систем та робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)
E-mail: jan.semjon@tuke.sk. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9076-7808
ResearcherID: AAH-6272-2019. **Scopus Author ID:** 55571411200

[3]аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)
E-mail: patrik.pilat@tuke.sk

ПОРІВНЯННЯ СИСТЕМ ВІРТУАЛЬНОГО НАЛАШТУВАННЯ: EKS ПРОТИ ISG VIRTUOS

У цій статті представлено порівняльний аналіз двох провідних платформ для віртуального введення в експлуатацію та розробки цифрових двійників у промисловій автоматизації: EKS та ISG virtuos. Спираючись на нещодавній досвід проєктів та технічну документацію, у статті оцінюються обидві системи з погляду можливостей моделювання, інтеграції робочих процесів, масштабованості та практичного впровадження в автомобільному та виробничому середовищі. Їх використання в автомобільній промисловості дозволяє підвищити конкурентоспроможність та скоротити час розгортання робочих місць з реального середовища. Можливість мати цифрового двійника на додаток до реальної фізичної моделі лінії дозволяє вносити модифікації до лінії протягом її життєвого циклу відповідно до поточних потреб виробництва. Зважаючи на досвід використання цифрових двійників, а також використання обох платформ, можна стверджувати, що кожна з них знаходить своє застосування. Дослідження, проведене для порівняння продуктивності платформ моделювання від 100 до 1000 деталей, дозволило точно кількісно оцінити їх продуктивність та зосередитися на перевірці необхідних параметрів. На основі проведеного аналізу можна припустити, що використання ISG virtuos є вигіднішим у складніших системах завдяки більшій масштабованості. EKS є більш вигідною, коли необхідно реалізувати швидше розгортання, а команда, яка розробляє такого цифрового двійника, має менше досвіду в цій галузі. Водночас це дозволяє забезпечити кращу підтримку та обслуговування, ніж у випадку з платформою ISG virtuos. Тому вибір відповідної платформи для конкретного застосування повинен базуватися на пріоритетах та вимогах до створення конкретного віртуального середовища, а також на знаннях і досвіді розробників. Під час порівняння обох платформ на різних типах деталей можливо, що результати можуть відрізнятися, і тому цей факт необхідно враховувати.

Ключові слова: *віртуальне введення в експлуатацію; цифровий двійник; EKS; віртуози ISG; промислова автоматизація; моделювання.*

Рис.: 4. Табл.: 2. Бібл.: 5.

Takac K., Semjo Ja., Pilat P. (2025). Comparison of virtual commissioning systems: EKS vs ISG virtuos. *Technical sciences and technologies,* (3(41)), 109-114. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-109-114.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-115-130
UDC 621.7

Oleksandr Yevdokymov[1], Vitalii Kolesnyk[2]

[1]Post-Graduate Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine), NGO Industry 5.UA (Sumy, Ukraine)
E-mail: o.yevdokymov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2172-6076

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
Machines and Tools, Sumy State University (Sumy, Ukraine), NGO Industry 5.UA (Sumy, Ukraine)
E-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0417-3801

DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR AUTOMATED SELECTION OF CUTTING TOOLS FOR A WEB APPLICATION

In the study, the decision-making methodology for a web application for automated cutting tool and tooling selection is considered. It is proposed that the constraint satisfaction logic method be used to filter the sets of alternatives in the application database, and the multi-criteria decision-making (MCDM) can be used to rank the alternatives further. For evaluation and ranking based on the proposed criteria, it is suggested that MCDM methods, including the weighted sum method (WSM) and the similarity preference ordering technique (TOPSIS) are used. A calculation using the specified methods for five alternatives (sets of cutting tools for mechanical turning) in the MATLAB environment was carried out. Based on the calculation, it was established that for a small sample, the WSM and TOPSIS methods had a similar result, but due to the difference in calculation approaches when the sample (filtered set of alternatives) increases, the result may differ, which makes it advisable to use these methods in parallel.

Keywords: *multi-criteria decision-making (MCDM); web application; constraint logic; automated selection; cutting tool; machining; filtering; ranking.*

Fig.: 6. Tables: 16. References: 21.

Relevance of the research. The cutting tool industry is steadily growing due to the expansion of the automotive, construction, and manufacturing sectors. This, in turn, creates demand both for cutting tools and for simplifying the process of their selection, since the choice of the correct cutting tool significantly impacts both the qualitative and economic factors of machining. One of the major factors influencing the selection process is the human factor (the competencies of a technologist or machine operator). The war and the reduction in the number and quality of personnel lead to decreased competencies and, as a consequence, reduced efficiency in cutting tool selection, which results in economic losses in manufacturing.

Target setting. To reduce the influence of the human factor on tool selection, software for automated tool selection is being increasingly applied. This software makes it possible to decrease the dependence on personnel competencies and significantly simplify the selection process in accordance with machining operations and production needs. Although there are several solutions for automated tool selection available on the market, their significant disadvantages include limited access, the requirement for local installation of the application, and/or a focus only on specific cutting tool manufacturers, which does not allow covering a wider range of cutting tools and equipment.

Actual scientific researches and issues analysis. At present, based on accumulated experience and practices, there exists a set of techniques that form the methodology of cutting tool selection [1, 2]. The methods of tool selection can be divided into manual and automated approaches [1]. In the manual method, technologists or machine operators use manufacturers' catalogs and websites of local or global suppliers of cutting tools, relying on their empirical experience, education, and knowledge. All this, in turn, may reduce the efficiency of selection due to a lack of experience and increase the impact of the human factor, leading to a greater number of non-optimal solutions [1, 3, 4]. A significant advantage of using these systems is relying on existing experience and considering input data about the workpiece in the selection process. In contrast, the drawback is their focus on certain manufacturers only (Sandvik Coromant ToolGuide, Walter GPS, Kennametal NOVO, Iscar IOTA), which significantly narrows the variability and range of cutting tools during selection. In automated applications, various algorithms can be used for decision-making, such as methods based on multi-criteria decision-making (MDCM) [5-7] as well as methods based on artificial intelligence [8].

© O. Yevdokymov, V. Kolesnyk, 2025

The multi-criteria decision-making method (MCDM) is widely applied in the foundations of algorithms for automated selection software. For example, Wang et al. used a combination of these MCDM methods as COPRAS-G (Complex Proportional Assessment of alternatives with grey relations), AHP (Analytic Hierarchy Process), and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) in a tool selection application [9].

Some applications are based on constraint logic [1; 10; 11], which does not always provide the possibility of obtaining flexible selection results. Using digital twins in combination with artificial intelligence methods is also possible [1].

Uninvestigated parts of general matters defining. A properly selected combination of the proposed methods can serve as a solid basis for implementing technical solutions in automated tool selection applications to address the identified issues. A relevant solution to the problem of tool selection is the development of a web application, which in turn makes it possible to resolve several technical challenges and reduce the influence of the human factor. This, in turn, creates the need to develop a decision-making methodology for the web application.

The purpose of the article to develop a methodology for decision-making, filtering, and criteria for the selection of cutting tools for a web-based automated tool selection application.

Methods. Considering existing solutions proposed in applications [5-7] and the general application scheme described in the study [1], it is suggested to use the MCDM method. To rationalize the selection process, AHP (Analytic Hierarchy Process) is applied, based on whose weights the alternatives are ranked using WSM (Weighted Sum Model) and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). This makes it possible to implement algorithms for selecting sets of cutting tools (tool–holder–adapter) based on a range of technical parameters and the experience of previous users. The proposed application scheme of the automated program is shown in Fig. 1.

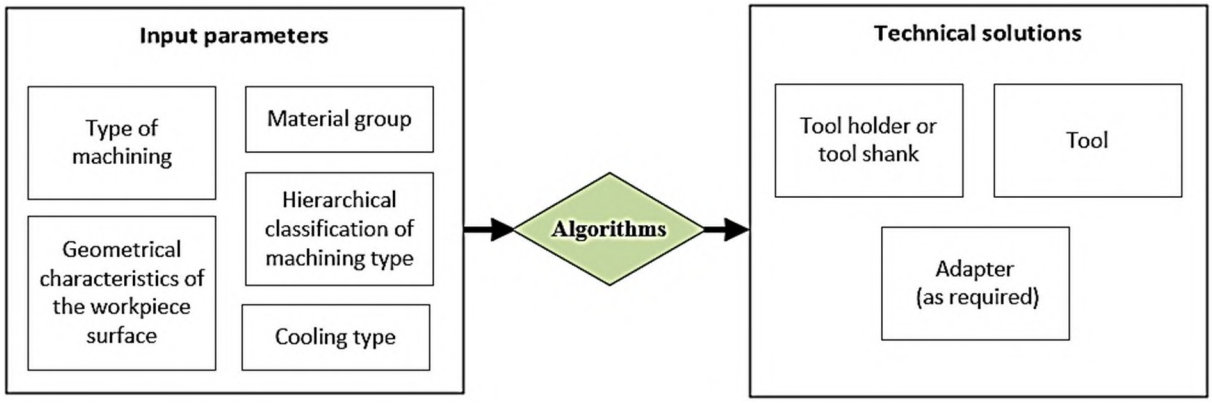


Fig. 1. Schematic diagram of the proposed application

To filter out technically unacceptable options from the electronic catalog (database), it is proposed to use the method of constraint satisfaction logic [12, 13]. (Constraint Satisfaction Problem, CSP). The constraint satisfaction logic method is a formal approach to selecting solutions that satisfy predefined conditions or constraints. This method is actively applied in planning, configuration, optimization, and design tasks.

The primary purpose of applying this method is to eliminate invalid and incompatible options (sets) before evaluating alternatives according to criteria [12].

Before filtering, it is necessary to form a set of alternatives. In the proposed application scheme, the set of alternatives consists of the available combinations (sets) of cutting tools stored in the database, which may include a tool (insert, drill, etc.), a toolholder, and an adapter (if required). At the first selection stage, admissible options are filtered according to the input

parameters defined by the user. Among these areas follows: workpiece material (group according to ISO 513 [14]), hierarchical classification of machining type, machining type (roughing, semi-finishing, finishing), geometric characteristics of the machined surface, type of cooling, and machine parameters. These parameters form the context of a specific manufacturing task.

Based on this context, the system generates a set of technically compatible alternatives through filtering (only those tool configurations that satisfy all the defined constraints are admitted). The filtered set of alternatives is then used for multi-criteria analysis. In this way, the formalization of the alternatives makes it possible to significantly reduce the number of options subject to evaluation, ensure compliance with technical requirements, and improve the relevance of the proposed solutions for a specific manufacturing situation. It also enables the identification of only technically and technologically suitable combinations from the total set of possible options, which is essential for further evaluation using AHP, WSM, and TOPSIS.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \quad (1)$$

where S – the set combinations of tool equipment [7].

$$S = \{s_i = (T_i, H_i, A_i)\} \quad (2)$$

where T_i – cutting tool, H_i – holder or shank, A_i – adapter (if required).

For further filtering of the sets, the user specifies the required input parameters through the graphical user interface:

Table 1 – Input Parameters

Parameter	Description
M	Material group according to ISO 513
P	Type of machining (roughing, semi-finishing, finishing)
O	Hierarchical classification of machining type (routing in the graphical interface)
G	Geometric characteristics of the machined surface (e.g., radius at the tip for finishing operations, or groove width for grooving tools)
C	Type of cooling (with cooling / without cooling)

After this, the set for filtering using the CSP method [12] is formed:

$$F = \{s_i = (T_i, H_i, A_i) \in S \mid f_{constraints}(s_i; M.P, O, G, C) = 1\} \quad (3)$$

where F – is the admissible (filtered) set,

S – is the set of all possible combinations;

$f_{constraints}$ – is a boolean (1 or 0) function indicating whether the set meets the technical requirements.

If $F = 1$ the combination is admissible; if $F = 0$ it is excluded.

This strict filtering function allows obtaining all tool/holder/adapter combinations s_i that satisfy the task parameters defined by the user and discarding incompatible options. This prevents the comparison of incompatible or impractical solutions during the multi-criteria analysis.

After the admissible set of alternatives is formed, the system proceeds to the stage of constructing the multi-criteria decision-making (MCDM) matrix, which serves as the fundamental tool of the MCDM method. Quantitative values are determined according to the specified criteria for each admissible alternative that has passed the filtering stage. As a result, a matrix is formed where each row represents an alternative and each column represents an evaluation criterion.

Thus, each alternative is represented as a vector that numerically describes its characteristics. The decision matrix functions as a formalization of the input data in the proposed application, aimed at selecting optimal tool combinations (sets) for machining operations. Once the admissible set of alternatives – i.e., combinations of "cutting tool–holder–adapter" – is established, a set of values is assigned for each alternative according to price, user ratings, supplier availability, and previous usage experience. This structure allows the system to evaluate options across multiple dimensions simultaneously and provides the basis for subsequent selection stages [15].

Each alternative s_i is represented as a vector of values according to the criteria [16]:

$$d_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots d_{im}), \tag{4}$$

where $d_{ij} \in \mathbb{R}$ – is the value of alternative s_i for criterion C_j;

m – is the number of criteria.

A vector of indicators is formed for each alternative. Next, all vectors d_{ij} are combined into a decision matrix $D \in \mathbb{R}^{n \times m}$ [16]:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

where $n -$ is the number of alternatives in the set F.

Each row of the matrix corresponds to one alternative, and each column corresponds to a criterion C_j. Each criterion C_j has its own optimization direction: minimization criteria, where lower values are better (e.g., price), and maximization criteria (e.g., rating).

The decision matrix is normalized to bring different criteria onto a common scale [0,1], enabling comparison. The resulting matrix is the normalized decision matrix [16]:

$$R = [r_{ij}] \in [0,1]^{n \times m} \tag{6}$$

For each criterion, if higher values are better:

$$r_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max_{ij} - \min d_{ij}}. \tag{7}$$

If lower values are better:

$$r_{ij} = \frac{\max d_{ij} - d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}. \tag{8}$$

The AHP (Analytic Hierarchy Process) method is used to determine the weights of the criteria used in WSM and TOPSIS [17]. The method is based on constructing a matrix of pairwise criteria comparisons according to the principle of "how much more important is one criterion than another". As a result of the comparisons, a quantitative vector of weights can be automatically calculated, reflecting the priority of each criterion in the overall model and checking the logical consistency of the provided ratings. The AHP method allows the administrator or web application developer to set a weight vector corresponding to each criterion's importance, per the user's strategy or expectation. For example, if the user needs the option "cheap, but with worse ratings", the weight of the price coefficient can be increased, and the weight of the rating coefficient can be reduced. This, in turn, allows the system to be adapted in the future to specific options for both the user and the developer. Thomas Saaty developed the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to formalize the process of making complex decisions.

First, it is necessary to construct a matrix of pairwise comparisons. For example, if we have n criteria $C_1, C_2, \dots, C_n$ we construct a square matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$, where each element a_{jk} means how much criterion j critical than criterion k [7]:

$$A = [a_{jk}], \tag{9}$$

where a_{jk} – relative preference of criterion j over k.

If $a_{jk} > 1$ – criterion j is more important than criterion k; $a_{jk} < 1$ – criterion j less important than k; $a_{jk} = 1$ – criterion is compared with itself; $a_{kj} = \frac{1}{a_{jk}}$ – reciprocal rule.

Table 2 – Saaty Scale for Criteria [18]

Value	Description
1	Equal importance
3	Moderate importance
5	Strong importance
7	Very strong importance
9	Absolute importance

For example, if the rating criterion is five times more important than price:

$$a_{rating.price} = 5, a_{price,rating} = \frac{1}{5}.$$

The next step is to perform column normalization, which is to scale the elements to a scale that will allow row comparisons. We normalize each component of the matrix a_{jk} by column k [7]:

$$\widetilde{a_{jk}} = \frac{a_{jk}}{\sum_{i=1}^{n} a_{jk}}. \quad (10)$$

This means that each element is divided by the sum of the corresponding column, i.e., all columns will have a sum = 1. We obtain the normalized matrix $\tilde{A}$.

Now we take the arithmetic mean of each row of the normalized matrix [7]:

$$w_j = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \widetilde{a_{jk}}, \text{ that is } w = (w_1, \dots, w_n). \quad (11)$$

The weight vector $w = (w_1, \dots, w_n)$ describes the relative importance of each criterion, derived from the expert assessments**.**

We perform a consistency check to ensure that the expert assessments are logical and not contradictory. The matrix product by the weight vector is calculated using the formula [7]:

$$(Aw)_j = \sum_{k=1}^{n} a_{jk} \cdot w_k. \quad (12)$$

The maximum eigenvalue λ_{max} is calculated [18]:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} \frac{(Aw)_j}{w_j}. \quad (13)$$

The consistency index (CI) is computed as [18]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1}. \quad (14)$$

The consistency ratio (CR) is defined as [18]:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (15)$$

where RI – random index.

The RI index is chosen according to the Saaty scale [18] and corresponds to the number of criteria *n*.

If $CR < 0.1$ – the matrix is consistent and weights can be used.

After determining the weights, the system evaluates alternatives using the WSM and/or TOPSIS methods. These methods allow ranking to the top of the set table those options that suit the user the most. This will allow the price, rating, availability, and use experience to be considered simultaneously.

Integral evaluation (WSM), Weighted Sum Model, is a weighted sum model, one of the most common decision-making methods by several criteria [19, 20]. In WSM, each alternative is evaluated according to a certain set of criteria, which are assigned weights according to their importance. As a result, a total score is calculated for each option, reflecting the degree of compliance with the specified requirements. As a result, you can get an ordered list of options, where

the best one will have the highest overall score. The WSM method is a simple and widely used multi-criteria evaluation method that allows you to calculate the integral score of each alternative based on the normalized values of the criteria and weights obtained by the AHP method.

To calculate this method, we need to have the decision matrix $R = [r_{ij}] \in [0,1]^{n\times m}$ and the weight vector $w = (w_1, \dots, w_n)$ determined by the AHP method. The integral score of each alternative s_i is calculated by the formula [20]:

$$U_i = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot r_{ij}. \quad (16)$$

Or in vector form [20]:

$$U_i = \vec{r_i} \cdot \vec{w}^{\mathrm{T}}, \quad (17)$$

where $\vec{r_i} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ – normalized vector of alternative s_i;

$\vec{w}$ – vector of criteria weights;

$U_i \in [0,1]$ – integral alternative score.

The obtained value of the integral score U_i always belongs to the interval [0,1], since both the normalized values and the weights lie within [0,1] and the sum of the weights is 1. The value of U_i reflects the overall utility or compliance of the alternative with all criteria, considering their weight. The larger the value of U_i the better the alternative is from the point of view of the given priority structure. This means that this alternative fulfills the requirements for essential criteria well. Options with high U_i, values are considered to be the most consistent with the expectations of the user or system and should be located at the top positions in the final ranking.

After calculating the values of U_i ranking is performed [20]:

$$U_{\pi(1)} \geq U_{\pi(2)} \geq \cdots U_{\pi(n)}, \quad (18)$$

where π – permutation of indices of alternatives;

$U_{\pi(1)}$ – best alternative.

The TOPSIS method (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) is that the optimal solution should be closest to the conditionally best alternative and as far away from the worst possible Each alternative is evaluated based on the distance to these two reference points in the multidimensional space of criteria. The TOPSIS method can be used in cases where the requirements have opposite directions (for example, it is desirable to maximize "quality" and minimize "cost"), which will ensure balanced decision-making. To calculate this method similarly to WSM, we need to have a decision matrix $R = [r_{ij}] \in [0,1]^{n\times m}$ and a weight vector $w = (w_1, \dots, w_n)$ determined by the AHP method.

First, the normalized decision matrix is constructed [21]:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}}. \quad (19)$$

Next, the weighted normalized matrix is formed [21]:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}. \quad (20)$$

The ideal and anti-ideal points are then determined [21]:

$$\mathrm{A}^+ = \left\{\max_i v_{ij}\right\}. \qquad A^- = \left\{\min_i v_{ij}\right\}. \quad (21)$$

Subsequently, the distances to the ideal and anti-ideal solutions are calculated [21]:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{4} (v_{ij} - A_j^+)^2}, \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{4} (v_{i=j} - A_j^-)^2}. \quad (22)$$

The index of proximity to ideals is calculated [21]:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+}, \quad C_i \in [0,1]. \tag{23}$$

Results. To verify the proposed methodology, we will calculate the ranking of sets (alternatives) for the transition of turning the external cylindrical surface of a part made of AISI 420 material. The calculation is performed using MATLAB 24 software, and Minitab 17 software is used to visualize the data. The block diagram of the sequence of the selection algorithm described in the methodology is shown in Fig. 2.

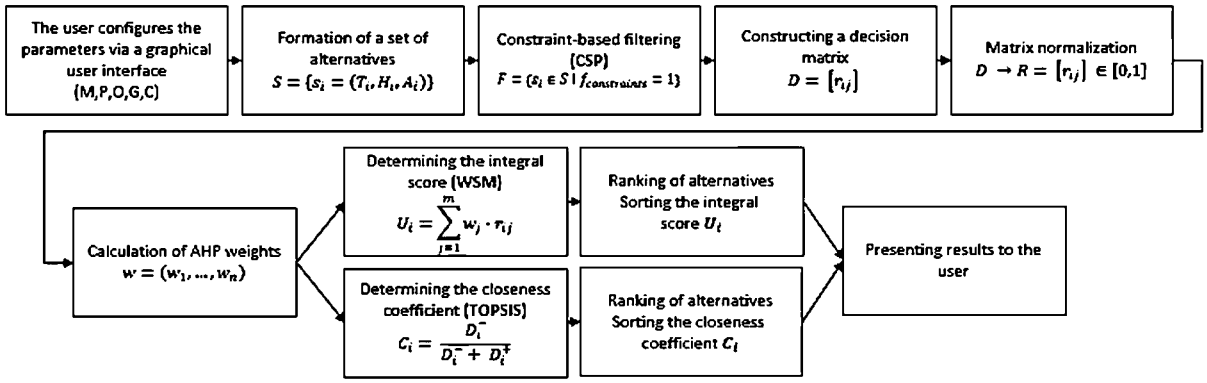


Fig. 2. Proposed methodology for selection algorithms

The input set of alternatives is presented in Table 3. The calculations will be performed for sets of turning tools, including the tool and holder. The tool inserts names in the table according to the international standard ISO 1832. For example, CNMG120408: C – insert shape (80°), N – relief angle of the insert (0°), M – insert tolerance class, G – insert clamping method, 12 – cutting edge length, 04 – insert thickness, 08 – nose radius (0,8 mm).

The holder coding follows ISO 5608. For example, MCLNL2525M12: M – insert clamping method, C – insert shape (80°), L – tool angle (95°), N – insert relief angle (0°), L – cutting direction (left), 2525 – tool height and width (25 × 25 mm), M – tool length (150 mm), 12 – cutting edge length.

Table 3 – Input Set of Alternatives

№	T (Tool)	H (Holder)
A_1	CNMG120408 LF6018 (Cemented carbide insert)	MCLNL2525M12 (left-hand turning tool)
A_2	CNMG120408 LF9018 (Cemented carbide insert)	DCLNL2525M12 (left-hand turning tool)
A_3	CNMG120408 P9125 (Cemented carbide insert)	MCLNL2020K12 (left-hand turning tool)
A_4	CNMG120408 YBC251 (Cemented carbide insert)	MCLNL2525M12 (left-hand turning tool)
A_5	CNMG120408 P8080 (Cemented carbide insert)	DCLNL2525M12 (left-hand turning tool)
A_6	DNMG110404-TM P9125 (Cemented carbide insert)	S20R-MDWNL11 (left-hand **boring** tool)
A_7	16 ER 1.5 ISO (Cemented carbide **threading** insert)	SER2020K16 (right-hand **threading** tool)
A_8	MGMN300 (Cemented carbide **grooving**/cutting insert)	MGHH320R 48/66 T25 (right-hand **grooving**/cutting tool)

The CSP method is applied for further filtering according to the user-defined input parameters. A schematic visualization of the filtering process is shown in Figure 3. The filtering parameters (M, P, O, G, C) are presented in Table 1.

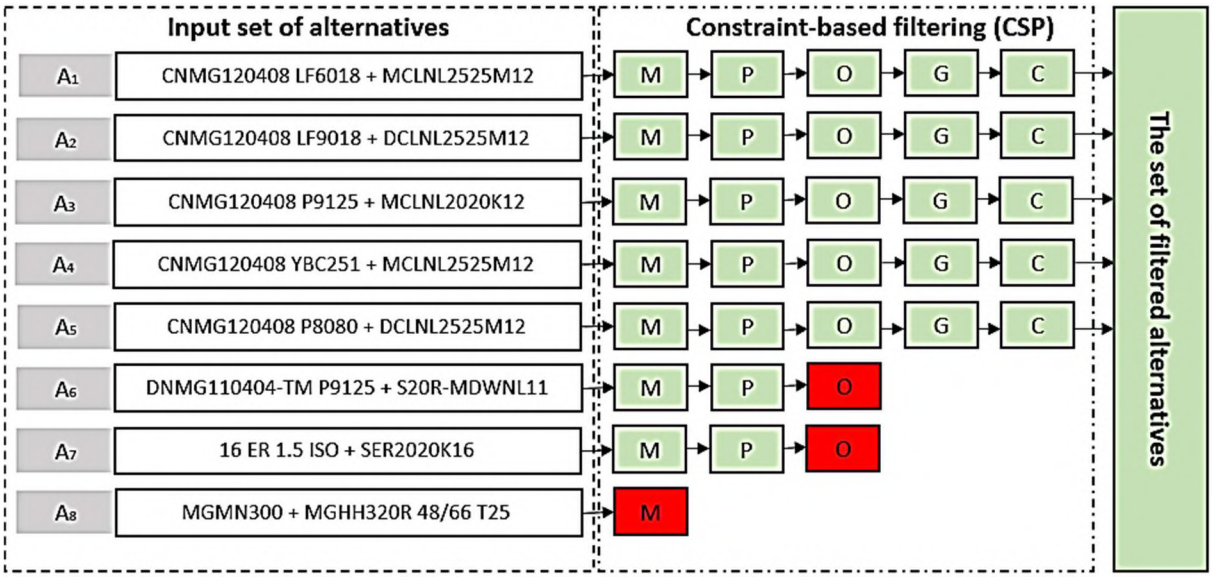


Fig. 3. CSP Filtering Scheme

Five out of eight sets passed the preliminary filtering. Sets A_6-A_8 did not pass the filtering because they do not match the operation type. The holder of set A_6 is unsuitable for external turning operations, nor is set A_7 (threading) or set A_8 for grooving/cutting operations. Additionally, set A_8 is incompatible with the material for which the insert can be applied. The filtered set of alternatives is summarized in Table 4.

Table 4 – Filtered set of alternatives

№	T (Tool)	H (Holder)	Price (T+H), UAH	Availability (1 – yes, 0 – no)	Rating (1-5)	Previous User Experience (1-5)
A_1	CNMG120408 LF6018	MCLNL2525M12	115+650	1	4,8	5
A_2	CNMG120408 LF9018	DCLNL2525M12	95+690	1	4,9	4
A_3	CNMG120408 P9125	MCLNL2020K12	135+480	1	4,5	4
A_4	CNMG120408 YBC251	MCLNL2525M12	190+650	0	3,9	3
A_5	CNMG120408 P8080	DCLNL2525M12	215+690	1	4,3	4

The name and current prices at the time of calculation are taken from the website of the Ukrainian supplier of the tool; the availability, rating, and previous experience are set in random order according to the rating scale in the application (from 1 to 5). The availability is set to 1 or 0 (1 means the item is available, 0 means it is unavailable).

Now it is necessary to determine the evaluation criteria, which criteria need to be maximized, and which, on the contrary, should be minimized. These criteria can be set or changed by the application developer/administrator. Four criteria are proposed: price, availability of the set from the supplier, rating given by all users who have already ordered this set, and previous experience (rating) of the user. We determine the price as the criterion that needs to be minimized, and the availability, rating, and previous experience as the criteria that need to be maximized. This will guarantee the user the best experience with lower prices. We enter the criteria data in Table 5.

Table 5 – Normalization Criteria

№	Criterion	Notation	Type of Criterion
1	Price	C_1	Minimize
2	Availability	C_2	Maximize
3	Rating	C_3	Maximize
4	Previous Experience	C_4	Maximize

The decision matrix $D = [d_{ij}]$ is constructed according to formula 5:

$$D = \begin{bmatrix} 765 & 1 & 4.8 & 5 \\ 785 & 1 & 4.9 & 4 \\ 615 & 1 & 4.5 & 4 \\ 840 & 0 & 3.9 & 3 \\ 905 & 1 & 4.3 & 4 \end{bmatrix}.$$

Rows represent the alternatives (sets) A_1, A_2A_3, A_4A_5, columns represent the criteria C_1 – price, C_2 – availability, C_3 – rating, C_4 – previous experience.

The next step is to normalize the decision matrix $D \rightarrow R$, The formulas and factors are summarized in Table 6.

Table 6 – Criteria and Normalization Formulas

Criterion	Notation	Type	Normalization Formula
Price	C_1	Cost	$r_{ij} = \frac{\max d_{ij} - d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}$
Availability	C_2	Benefit	$r_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}$
Rating	C_3	Benefit	$r_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}$
Experience	C_4	Benefit	$r_{ij} = \frac{d_{ij} - \min d_{ij}}{\max d_{ij} - \min d_{ij}}$

To perform normalization, it is necessary to specify the normalization threshold values for each criterion; for this, we take data from the table of alternatives (Table 7). Where min is the minimum value of the criterion, and max is the maximum value.

Table 7 – Normalization Criteria Values

Factor	min	max
Price	615	905
Availability	0	1
Rating	3,9	4,9
Experience	3	5

Next step calculates the results of the normalization $R = [r_{ij}]$ and enter them in Table 8, as a result we obtain the matrix normalized matrix *R*.

Table 8 – Normalization Calculation

Alternative	C_1	C_2	C_3	C_4
A_1	$\frac{905-765}{290} = 0{,}4828$	1	$\frac{4{,}8-3{,}9}{1{,}0} = 0{,}9$	$\frac{5-3}{2} = 1.0$
A_2	$\frac{905-785}{290} = 0{,}4138$	1	$\frac{4{,}9-3{,}9}{1{,}0} = 1.0$	$\frac{4-3}{2} = 0.5$
A_3	$\frac{905-615}{290} = 1$	1	$\frac{4{,}5-3{,}9}{1{,}0} = 0{,}6$	$\frac{4-3}{2} = 0.5$
A_4	$\frac{905-840}{290} = 0{,}2241$	0	$\frac{3{,}9-3{,}9}{1{,}0} = 0{,}0$	$\frac{3-3}{2} = 0.0$
A_5	$\frac{905-905}{290} = 0{,}0000$	1	$\frac{4{,}3-3{,}9}{1{,}0} = 0{,}4$	$\frac{4-3}{2} = 0.5$

After that, we build a matrix of pairwise comparisons $A = [a_{jk}]$, and manually set the criteria according to the Saaty scale (Table 9). The importance of each criterion can be changed depending on the need, and it provides flexibility in selection.

Table 9 – Pairwise Comparison Matrix

	Price C_1	Availability C_2	Rating C_3	Experience C_4
Price	1	1/3	1/7	1/5
Availability	3	1	1/5	1/3
Rating	7	5	1	3
Experience	5	3	1/5	1

The pairwise comparison matrix a_{jk}, is then normalized, with results summarized in Table 10:

$$\widetilde{a_{jk}} = \frac{a_{jk}}{\sum_{i=1}^{n} a_{jk}}.$$

Table 10 – Normalized Pairwise Comparison Matrix

Criterion	Price C_1	Availability C_2	Rating C_3	Experience C_4	Average w_j
Price	0,0625	0,0357	0,0853	0,0441	0,0569
Availability	0,1875	0,1071	0,1190	0,0730	0,1217
Rating	0,4375	0,5357	0,5968	0,6620	0,5580
Experience	0,3125	0,3214	0,1990	0,2208	0,2634

Let's define the final normalized weight vector of criteria:

$$\vec{w} = (w_{price}, w_{availability}, w_{rating}, w_{experience}) = (0{,}057, 0{,}122, 0{,}558, 0{,}263).$$

Then check for consistency and record the results:

$$(Aw)_1 = 0{,}231\ (Aw)_2 = 0{,}493, (Aw)_3 = 2{,}356, (Aw)_4 = 1{,}100.$$

The next step is to calculate $\frac{(Aw)_j}{w_j}$, the data are summarized in Table 11:

Table 11 – Consistency Check

J	$(\mathrm{Aw})_j$	w_j	$\frac{(\mathrm{Aw})_j}{w_j}$
1	0.231	0.057	4.053
2	0.493	0.122	4.041
3	2.356	0.558	4.221
4	1.100	0.263	4.184

Next, the maximum eigenvalue λ_{max}: is calculated as:

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{(\mathrm{Aw})_j}{w_j} = \frac{1}{4}(4{,}063 + 4{,}041 + 4{,}221 + 4{,}184) \approx \frac{16{,}499}{4}.$$

The Consistency Index (CI) is then computed as:

$$\mathrm{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{4{,}125 - 4}{3} \approx 0{,}0417.$$

The Consistency Ratio (CR) is calculated using RI = 0.90, for n = 4, [18]:

$$\mathrm{CR} = \frac{\mathrm{CI}}{\mathrm{RI}} = \frac{0{,}0417}{0{,}90} \approx 0{,}046 < 0{,}1 \Longrightarrow \text{Consistency is acceptable.}$$

Having obtained the necessary data, calculate the Integral Score of each alternative using the WSM (Weighted Sum Model) method. Normalized matrix from previous calculations $R = [r_{ij}]$:

Table 12 – Normalized Decision Matrix

Tool + Holder	Price	Availability	Rating	Experience
CNMG120408 LF6018 + MCLNL2525M12	0,4828	1	0,9	1
CNMG120408 LF9018 + DCLNL2525M12	0,4138	1	1,000	0,5
CNMG120408 P9125 + MCLNL2020K12	1	1	0,6	0,5
CNMG120408 YBC251 + MCLNL2525M12	0,2241	0	0,0	0,0
CNMG120408 P8080 + DCLNL2525M12	0	1	0,4	0,5

Calculate the integral estimate of each set using formula 16:

Table 13 – Integral Scores of Alternatives Using the WSM Method

№	Set	Integral Score U_i
A_1	**CNMG120408 LF6018 + MCLNL2525M12**	**0,9147**
A_2	CNMG120408 LF9018 + DCLNL2525M12	0,8351
A_3	CNMG120408 P9125 + MCLNL2020K12	0,6453
A_5	CNMG120408 P8080 + DCLNL2525M12	0,4767
A_4	CNMG120408 YBC251 + MCLNL2525M12	0,0128

According to the WSM method, the best alternative is set **A_1 (LF6018 + MCLNL2525M12)** with a score of **0.9147**. This set will be displayed first in the application. The ranking of all sets is visualized in the chart (Fig. 4).

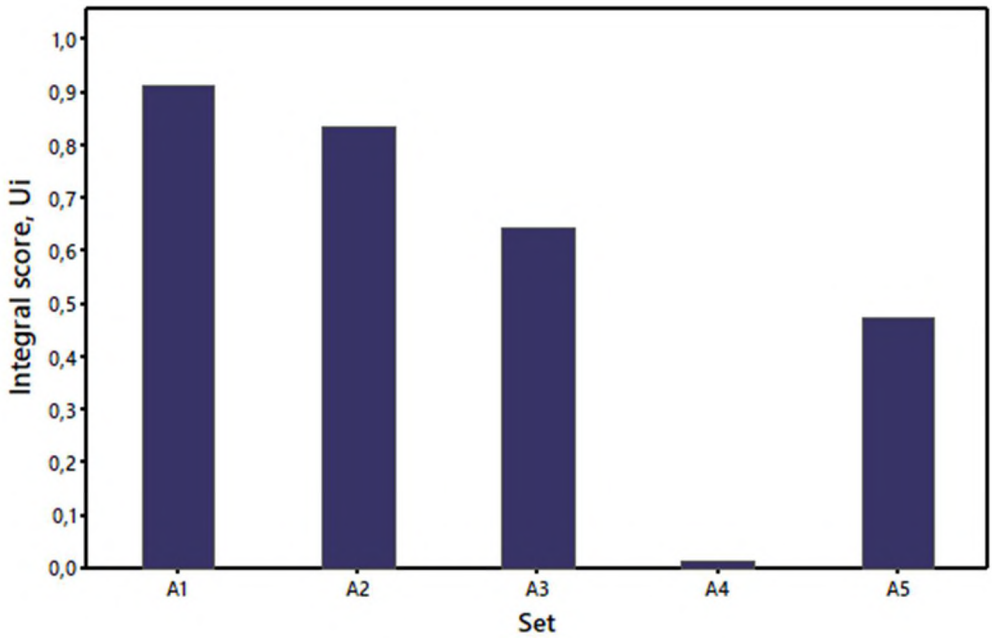


Fig. 4. Integral Scores of WSM Method

Next we'll perform the calculation using the TOPSIS method. This method can be used both alternatively and in parallel with the WSM method. As input data, similarly to the WSM method, we'll use the normalized matrix $R = [r_{ij}]$ and the weight vector:

$$\vec{w} = (0{,}057, 0{,}122, 0{,}558, 0{,}263).$$

Construct the weighted normalized matrix:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}.$$

Table 14 – Weighted Normalized Matrix

№	v_1 Price	v_2 Availability	v_3 Rating	v_4 Experience
A1	0,0275	0,1220	0,5022	0,2630
A2	0,0236	0,1220	0,5580	0,1315
A3	0,0570	0,1220	0,3348	0,1315
A4	0,0128	0,000	0,0000	0,0000
A5	0,0000	0,1220	0,2232	0,1315

Let's determine the positive and negative ideal solutions, positive ideal:

$A^+ = (\max v_1, \max v_2, \max v_3, \max v_{4)} = (0.0570, 0.1220, 0.5580, 0.2630)$.

Negative ideal:

$A^- = (min\, v_1, \min v_2, \min v_3, \min v_{4)} = (0.0000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)$.

Let's calculate the distances to the ideals:

$$D_1^+ = \sqrt{(0.0275 - 0.057)^2 + (0.122 - 0.122)^2 + (0.5022 - 0.558)^2 + (0.263 - 0.263)^2} \approx 0.0631$$

$$D_1^- = \sqrt{(0.0275)^2 + (0.122)^2 + (0.5022)^2 + (0.263)^2} \approx 0.5805.$$

The closeness coefficient is computed as:

$$C_1 = \frac{D_1^-}{D_1^- + D_1^+} = \frac{0{,}5805}{0{,}0631 + 0{,}5805} = 0{,}9019\,.$$

Table 15 – Closeness Coefficient

№	Tool + Holder	D_i^+	D_i^-	C_i	Rank
A1	**CNMG120408 LF6018 + MCLNL2525M12**	**0,0631**	**0,5805**	**0,9019**	**1**
A2	CNMG120408 LF9018 + DCLNL2525M12	0,1357	0,5866	0,8122	2
A3	CNMG120408 P9125 + MCLNL2020K12	0,2591	0,3841	0,5972	3
A5	CNMG120408 P8080 + DCLNL2525M12	0,3642	0,2863	0,4402	4
A4	CNMG120408 YBC251 + MCLNL2525M12	0,6304	0,0128	0,1999	5

Similar to WSM, the best alternative according to the TOPSIS method is **A1 (CNMG120408 LF6018 + MCLNL2525M12)** with score **0.9147**. The closeness coefficient for all alternatives is visualized in the graph (Fig. 5).

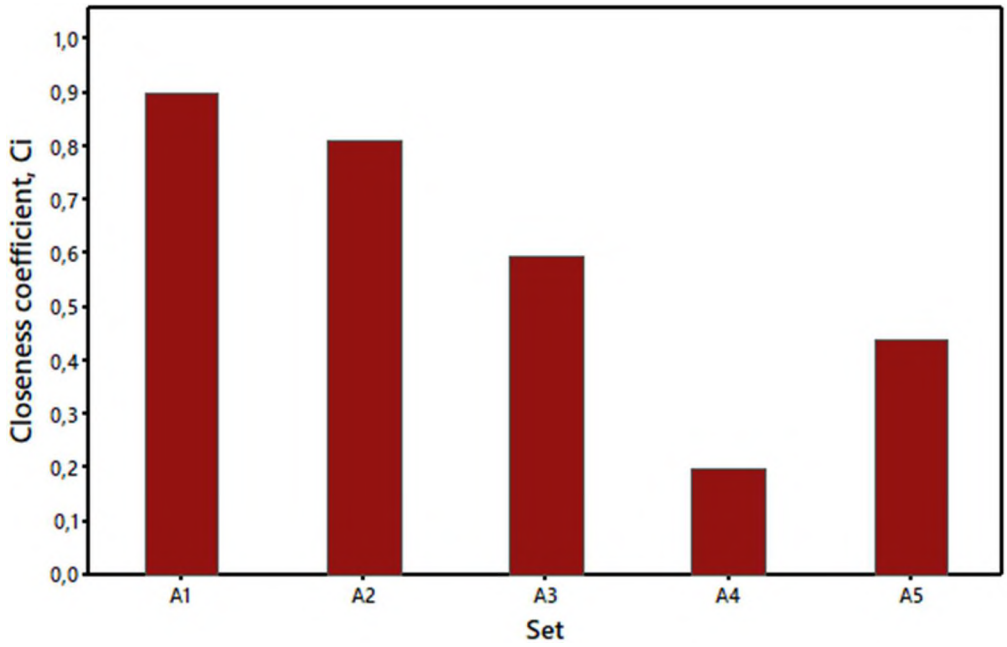


Fig. 5. TOPSIS Closeness Coefficient

Using the calculation results from the WSM and TOPSIS methods, we construct a comparative table of results (Table 16).

Table 16 – Integral Score and Closeness Coefficient

№	Tool + Holder	WSM Integral Score U_i	TOPSIS Closeness Coefficient C_i
A1	**CNMG120408 LF6018 + MCLNL2525M12**	**0,9147**	**0,9019**
A2	CNMG120408 LF9018 + DCLNL2525M12	0,8351	0,8122
A3	CNMG120408 P9125 + MCLNL2020K12	0,6453	0,5972
A5	CNMG120408 P8080 + DCLNL2525M12	0,4767	0,4402
A4	CNMG120408 YBC251 + MCLNL2525M12	0,0128	0,1999

It can be seen that both methods ranked the proposed sets equally; the best option for both methods was set A1, while the worst result was set A4. A comparison of the scores of both methods is shown in Figure 6.

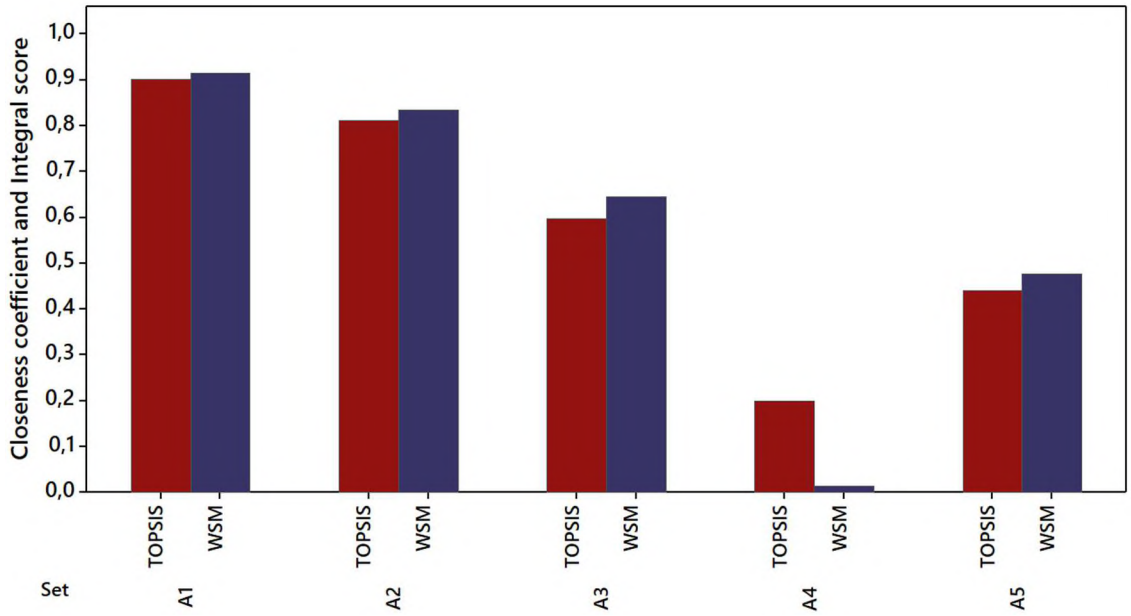


Fig. 6. Comparative chart of Integral Score and Closeness Coefficient

Conclusions. The study revealed that the human factor influences the selection process, and, as a result, incorrect selection of a cutting tool can negatively affect the economic and quality characteristics of the machining process of parts. One of the methods for solving this problem is to automate the selection of the cutting tool. To solve this problem, it is proposed that the methods of multi-criteria decision-making be supplemented to form a methodological basis for creating a web application for automated selection of cutting tools and technological equipment. A calculation was performed to verify the proposed calculation and ranking methodology.

1. To perform the actual selection of a cutting tool and its ranking in the application, it is advisable to use the preliminary method of CSP hard filtering, which will allow forming an actual set of sets of technical solutions for machining in mechanical operations.

2. It is proposed that further ranking of technical solutions using MCDM methods, namely AHP, WSM, and TOPSIS, be performed.

3. The WSM and TOPSIS methods can be used as independent parts of the decision-making algorithm, or in parallel, to obtain a more rational tool (experience-price) in the selection process.

4. The calculation showed that both methods give the same ranking result for a certain sample of sets, but this may change with a significant increase in alternatives. Therefore, it is advisable to use both methods in parallel for a better-quality result.

The current issue is the further implementation of the proposed methods into the technical algorithm of the web application.

Acknowledgments

The research was conducted in the frame of a research grant, "Development of a smoke-automated control for the protection of evacuation vehicles and mobile posts." (State registration 0124U000538) funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine. The article was prepared with the assistance and technical support of the non-government organization "INDUSTRY 5.UA".

References

1. Navaneethan, G., Palanisamy, S., Jayaraman, P. P., Kang, Y. B., Stephens, G., Papageorgiou, A., & Navarro, J. (2024). A review of automated cutting tool selection methods. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 133(3), 1063-1082. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13823-1.

2. Yevdokymov, O., Kolesnyk, V., Dovhopolov, A., Bykov, M., & Fesenko, D. (2025). Increasing productivity of processing the mortar body component. *Technical Sciences and Technologies,* (2 (40)), 137-147. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-137-147.

3. Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P., & Phanden, R. K. (2023). Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology. Materials Today: Proceedings, 78, 444-448. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.253.

4. Shi, K. N., Liu, N., Wang, S. B., Ren, J. X., & Yuan, Y. (2019). Experimental and theoretical investigation of milling tool selection towards energy-efficient process planning in discrete parts manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(1), 1099-1107. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03960-3.

5. Li, A., Zhao, J., Gong, Z., & Lin, F. (2016). Optimal selection of cutting tool materials based on multi-criteria decision-making methods in machining Al-Si piston alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86(1), 1055-1062. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8200-1.

6. Duan, Y., Hou, L., & Leng, S. (2021). A novel cutting tool selection approach based on a metal cutting process knowledge graph. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112(11), 3201-3214. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06606-5.

7. Phung, X. L., Truong, H. S., & Bui, N. T. (2019). Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. Applied Sciences, 9(20), 4308. https://doi.org/10.3390/app9204308.

8. Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, a review. Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2, 100009. https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009.

9. Wang, R., Zhao, W., Luo, C. J., Wang, Z. Y., & Luo, T. (2016). Research on intelligent tool selection system based on Optimization model. Key Engineering Materials, 693, 1765-1771. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.693.1765.

10. Zubair, A. F., & Mansor, M. S. A. (2019). Embedding firefly algorithm in optimization of CAPP turning machining parameters for cutting tool selections. Computers & Industrial Engineering, 135, 317-325. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.006.

11. Jha, N. K. (1997). A set-theoretic automatic selection of cutting tools in manufacturing system. Journal of materials processing technology, 65(1-3), 99-106. https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02248-1.

12. Mackworth, A. K. (1992). The logic of constraint satisfaction. Artificial Intelligence, 58(1-3), 3-20. https://doi.org/10.1016/0004-3702(92)90003-G.

13. Madelaine, F., & Stewart, I. A. (2007). Constraint satisfaction, logic and forbidden patterns. SIAM Journal on Computing, 37(1), 132-163 https://doi.org/10.1137/050634840.

14. International Organization for Standardization. (2012). ISO 513:2012: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application.

15. Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., & Venkatesan, V. P. (2013). A survey on multi criteria decision making methods and its applications. American Journal of Information Systems, 1(1), 31-43. https://doi.org/10.12691/ajis-1-1-5.

16. Majumder, M. (2015). Multi criteria decision making. In Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations (pp. 35-47). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-73-3_2.

17. Ho, W., Xu, X., & Dey, P. K. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. European Journal of operational research, 202(1), 16-24. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.009.

18. Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. Interfaces, 24(6), 19-43. https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19.

19. Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. Structural and multidisciplinary optimization, 41(6), 853-862. https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7.

20. Kaddani, S., Vanderpooten, D., Vanpeperstraete, J. M., & Aissi, H. (2017). Weighted sum model with partial preference information: Application to multi-objective optimization. European Journal of Operational Research, 260(2), 665-679. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.003.

21. Papathanasiou, J., & Ploskas, N. Multiple Criteria Decision Aid-Methods, Examples and Python Implementations, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2018. https://doi. org/10.1007/978-3-319-91648-4.

Список використаних джерел

1. Navaneethan, G., Palanisamy, S., Jayaraman, P. P., Kang, Y. B., Stephens, G., Papageorgiou, A., & Navarro, J. (2024). A review of automated cutting tool selection methods. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 133(3), 1063-1082. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13823-1.

2. Yevdokymov, O., Kolesnyk, V., Dovhopolov, A., Bykov, M., & Fesenko, D. (2025). Increasing productivity of processing the mortar body component. *Технічні науки та технології, (2 (40)),* 137-147. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-137-147.

3. Aman, A., Bhardwaj, R., Gahlot, P., & Phanden, R. K. (2023). Selection of cutting tool for desired surface finish in milling Machine using Taguchi optimization methodology. *Materials Today: Proceedings, 78,* 444-448. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.253.

4. Shi, K. N., Liu, N., Wang, S. B., Ren, J. X., & Yuan, Y. (2019). Experimental and theoretical investigation of milling tool selection towards energy-efficient process planning in discrete parts manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104(1),* 1099-1107. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03960-3.

5. Li, A., Zhao, J., Gong, Z., & Lin, F. (2016). Optimal selection of cutting tool materials based on multi-criteria decision-making methods in machining Al-Si piston alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86(1),* 1055-1062. https://doi.org/10.1007/s00170-015-8200-1.

6. Duan, Y., Hou, L., & Leng, S. (2021). A novel cutting tool selection approach based on a metal cutting process knowledge graph. T*he International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 112(11)*, 3201-3214. https://doi.org/10.1007/s00170-021-06606-5.

7. Phung, X. L., Truong, H. S., & Bui, N. T. (2019). Expert system based on integrated fuzzy AHP for automatic cutting tool selection. *Applied Sciences, 9(20),* 4308. https://doi.org/10.3390/app9204308.

8. Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, a review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics, 2,* 100009. https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009.

9. Wang, R., Zhao, W., Luo, C. J., Wang, Z. Y., & Luo, T. (2016). Research on intelligent tool selection system based on Optimization model. Key Engineering Materials, 693, 1765-1771. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.693.1765.

10. Zubair, A. F., & Mansor, M. S. A. (2019). Embedding firefly algorithm in optimization of CAPP turning machining parameters for cutting tool selections. *Computers & Industrial Engineering, 135,* 317-325. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.006.

11. Jha, N. K. (1997). A set-theoretic automatic selection of cutting tools in manufacturing system. *Journal of materials processing technology, 65(1-3)*, 99-106. https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02248-1.

12. Mackworth, A. K. (1992). The logic of constraint satisfaction. *Artificial Intelligence, 58(1-3),* 3-20. https://doi.org/10.1016/0004-3702(92)90003-G.

13. Madelaine, F., & Stewart, I. A. (2007). Constraint satisfaction, logic and forbidden patterns. *SIAM Journal on Computing, 37(1),* 132-163 https://doi.org/10.1137/050634840.

14. International Organization for Standardization. (2012). ISO 513:2012: Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – Designation of the main groups and groups of application.

15. Aruldoss, M., Lakshmi, T. M., & Venkatesan, V. P. (2013). A survey on multi criteria decision making methods and its applications. *American Journal of Information Systems, 1(1),* 31-43. https://doi.org/10.12691/ajis-1-1-5.

16. Majumder, M. (2015). Multi criteria decision making. In Impact of urbanization on water shortage in face of climatic aberrations (pp. 35-47). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-73-3_2.

17. Ho, W., Xu, X., & Dey, P. K. (2010). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of operational research, 202(1),* 16-24. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.009.

18. Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces, 24(6),* 19-43. https://doi.org/10.1287/inte.24.6.19.

19. Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and multidisciplinary optimization, 41(6)*, 853-862. https://doi.org/10.1007/s00158-009-0460-7.

20. Kaddani, S., Vanderpooten, D., Vanpeperstraete, J. M., & Aissi, H. (2017). Weighted sum model with partial preference information: Application to multi-objective optimization. *European Journal of Operational Research, 260(2)*, 665-679. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.003.

21. Papathanasiou, J., & Ploskas, N. Multiple Criteria Decision Aid-Methods, Examples and Python Implementations, Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91648-4.

Отримано 03.09.2025

УДК 621.7

Олександр Дмитрович Євдокимов[1], Віталій Олександрович Колесник[2],

[1]аспірант кафедри технології машинобудування верстати та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна), ГО «СКІМ Індустрія 5.ЮА»(Суми, Україна)
E-mail: o.yevdokymov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-2172-6076

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна), ГО «СКІМ Індустрія 5.ЮА»(Суми, Україна)
E-mail: v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0417-3801

РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПІДБОРУ РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВЕБЗАСТОСУНКУ

У дослідженні розглянуто методологію ухвалення рішень для вебзастосунку автоматизованого підбору ріжучого інструменту та оснащення. Автоматизований підбір має низку переваг перед ручним підбором ріжучого інструменту технічним персоналом, в тому числі дозволяє знизити вплив людського фактору на процес підбору, що позитивно впливає на технічні та економічні показники процесу механічної обробки. Запропоновано використовувати метод жорсткої логіки обмежень (CSP) для фільтрації множин альтернатив бази даних застосунку, а для подальшого ранжування альтернатив використовувати метод багатокритеріального прийняття рішень (MCDM) та методику побудови ваг AHP. Для оцінки та ранжування інструменту або оснащення на основі визначених критеріїв запропоновано використовувати такі методики MCDM, як метод зваженої суми (WSM) для визначення інтегральної суми та техніку впорядкування переваг за схожістю (TOPSIS) для визначення коефіцієнтів близькості. Описано схему використання запропонованих методів у застосунку. Проведено розрахунок на основі зазначених методів для п'яти альтернатив (сетів ріжучого інструменту для процесу механічної токарної обробки) в середовищі MATLAB. Результатами розрахунку визначено, що для невеликої вибірки методи WSM та TOPSIS мали схожий результат, але через відмінність підходів обчислення при збільшенні вибірки (фільтрованої множини альтернатив) результат може відрізнятися, що робить доцільним застосування цих методів паралельно. Актуальним питанням є подальше впровадження запропонованої методології при розробці вебзастосунку для автоматизованого підбору ріжучого інструменту та оснащення.

Ключові слова: *метод багатокритеріального прийняття рішень; вебзастосунок; логіка обмежень; автоматизований підбір; ріжучий інструмент; обробка різанням; фільтрація; ранжування.*

Рис.: 6. Табл.: 16. Бібл.: 21.

Yevdokymov, O., Kolesnyk, V. (2025). Development of a methodology for automated selection of cutting tools for a web application. *Technical sciences and technologies*, (3(41)), 115-130. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-115-130.

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-131-145
УДК 004.056.5:004.89:005.8:519.876.5

Віктор Федорович Гречанінов
кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач науково-дослідного відділу
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України (Київ, Україна)
E-mail: vgrechaninov@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6268-3204

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА СЦЕНАРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ ЗАХИЩЕНОСТІ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті представлено інтелектуальну систему моделювання сценаріїв оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури з використанням методів штучного інтелекту. Розроблено формалізовану модель сценарного аналізу, що поєднує машинне навчання, нечітку логіку та графові структури для відображення взаємозв'язків між активами, загрозами, уразливостями й контрзаходами. Система забезпечує автоматизовану генерацію сценаріїв інцидентів із урахуванням часової динаміки ризику та може бути використана в центрах моніторингу безпеки й цифрових двійниках кіберзахисту.

Ключові слова: *оцінка ризику; моделювання сценаріїв; штучний інтелект; критична інфраструктура; нечітка логіка; граф ризику; машинне навчання; кіберзахищеність; цифрові двійники.*
Рис.: 5. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Об'єкти критичної інфраструктури відіграють визначальну роль у функціонуванні держави, забезпечуючи стабільність енергетичних, транспортних, комунікаційних та фінансових систем [6; 9; 12]. З огляду на зростання кількості складних цілеспрямованих кібератак, що уражають енергетичні компанії, транспортні вузли та телекомунікаційні мережі, виникає нагальна потреба переходу від реактивних підходів до проактивного сценарного моделювання стану захищеності [2-3; 10].

Постановка проблеми. Проблема забезпечення належного рівня захищеності об'єктів критичної інфраструктури (ОКІ) набуває особливої актуальності в умовах зростання кількості цілеспрямованих кібератак, ускладнення їхньої структури та інтеграції шкідливих дій у промислові й енергетичні процеси [1-2; 6]. Традиційні методи оцінювання безпеки, передбачені стандартами ISO/IEC 27005, NIST SP 800-30 чи OCTAVE, не відображають реальної динаміки ризиків, оскільки спираються на статичні експертні оцінки й не враховують часову змінність уразливостей, взаємозалежність активів і реакцію контрзаходів [7; 9]. Це призводить до несвоєчасного оновлення профілю ризику, недостатньої адаптивності систем захисту та втрати релевантності ухвалених рішень у кризових ситуаціях.

Необхідність переходу до інтелектуальних методів аналізу зумовлена потребою в оперативному прогнозуванні стану захищеності ОКІ та побудові динамічних сценаріїв розвитку подій у разі реалізації загроз [1-5; 15]. Запровадження штучного інтелекту в процес оцінювання дозволяє відмовитися від жорстких детермінованих моделей на користь адаптивних систем, здатних до самонавчання на основі історичних інцидентів і телеметричних даних [4; 8; 11]. Інтелектуальна система моделювання сценаріїв оцінки захищеності передбачає використання машинного навчання, нечіткої логіки та графових структур для відображення причинно-наслідкових зв'язків між активами, загрозами, уразливостями й контрзаходами [5; 6; 8; 9; 11-12; 14-16], що забезпечує побудову інтегрованої моделі ризику в часовому вимірі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі спостерігається посилена увага до використання методів штучного інтелекту для оцінювання ризиків і забезпечення захищеності об'єктів критичної інфраструктури. Так, у роботі [1] представлено AI-орієнтовану модель ідентифікації ризиків інфраструктурних проєктів, що використовує історичні дані для виявлення закономірностей ризикових факторів, однак запропонований

© В. Ф. Гречанінов, 2025

підхід не враховує багатокроковість сценаріїв та часову динаміку впливу загроз. У дослідженні [2] проаналізовано застосування машинного навчання для прогнозування кіберризиків у критичних інфраструктурах, із фокусом на детекції аномалій, проте без інтеграції графових моделей зв'язків між активами, уразливостями й контрзаходами.

В огляді [3] висвітлено роль генеративного штучного інтелекту та великих мовних моделей у захисті критичних систем, визначено ключові виклики, пов'язані з надійністю, пояснюваністю та безпечністю моделей, але не запропоновано практичної реалізації сценарного аналізу ризиків. У роботі [4] подано автономну AI-архітектуру для виявлення уразливостей і реагування на загрози в реальному часі, проте система має загальний характер і не враховує сценарне прогнозування змін рівня ризику.

Автори роботи [5] розглянули інтеграцію моделей машинного навчання у сфері національної безпеки й критичної інфраструктури, проте не подали механізмів побудови сценаріїв чи оцінки ефективності контрзаходів у динамічному середовищі.

Таким чином, проаналізовані праці свідчать про активний розвиток напрямів застосування AI для прогнозування ризиків і виявлення аномалій у критичних системах, однак залишаються недостатньо опрацьованими питання інтегрованого сценарного моделювання, графового представлення взаємозв'язків між загрозами, активами й контрзаходами, а також забезпечення пояснюваності й адаптивного оновлення сценаріїв у режимі реального часу. Ці наукові прогалини визначають потребу у створенні комплексної інтелектуальної системи, що поєднає методи штучного інтелекту, сценарний аналіз і динамічне управління ризиками для об'єктів критичної інфраструктури.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявність численних досліджень із питань оцінювання ризиків та захищеності об'єктів критичної інфраструктури, низка аспектів залишається маловивченою. Більшість існуючих підходів є статичними й не враховують динамічну зміну стану систем, появу нових загроз та взаємозалежність між активами, уразливостями й контрзаходами. Недостатньо розроблені методи автоматизованого формування сценаріїв розвитку інцидентів з урахуванням часової динаміки ризику та реального контексту подій. Недослідженою також залишається інтеграція штучного інтелекту в процес моделювання оцінки захищеності, зокрема поєднання нейронних мереж, нечіткої логіки та графових структур. Відсутність ефективних механізмів пояснюваного аналізу рішень ускладнює інтерпретацію результатів для експертів кіберзахисту. Крім того, бракує підходів до створення цифрових двійників, що дозволяли б симулювати сценарії атак і оцінювати ефективність контрзаходів. Отже, подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення інтелектуальної системи сценарного моделювання, здатної поєднати машинне навчання, нечітку логіку та механізм пояснюваного аналізу рішень для адаптивної оцінки захищеності й прогнозування ризиків у режимі реального часу.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення інтелектуальної системи сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури, яка на основі методів штучного інтелекту, машинного навчання, нечіткої логіки та графових структур забезпечує автоматизоване формування сценаріїв розвитку інцидентів, прогнозування динаміки ризиків і визначення оптимальних контрзаходів для підвищення рівня кіберстійкості та адаптивності систем захисту.

Виклад основного матеріалу. Побудова інтелектуальної системи сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури потребує формального опису її структури та взаємозв'язків між компонентами [6; 11; 16]. Для цього розроблено математичну модель, що поєднує методи машинного навчання, нечіткої логіки, графових структур і пояснюваного штучного інтелекту [8; 10]. Такий підхід забезпечує можливість виконання адаптивного аналізу ризику в динамічних умовах кіберзагроз, коли оцінка захищеності має не лише статичний, а і прогностичний характер.

У межах цієї моделі кожен сценарій розглядається як формалізована структура, яка об'єднує активи, загрози, уразливості, контрзаходи та прогноз ризику, що дозволяє перейти до аналітичного опису процесів зміни рівня безпеки у часі [9; 12; 16].

Формалізована модель сценарію описується шісткою:

$$S_i = \langle A_i, T_i, V_i, C_i, R_i(t), P_i \rangle, \quad (1)$$

де A_i – множина активів системи;

T_i – множина загроз;

V_i – множина уразливостей;

C_i – набір контрзаходів;

$R_i(t)$ – значення ризику в момент часу t;

P_i – прогнозований сценарій розвитку події [6-8; 12].

Таке формальне представлення дає змогу структурно пов'язати всі ключові компоненти системи безпеки в єдину модель, що описує не лише поточний стан, а і прогнозовану динаміку ризику. Воно забезпечує можливість інтеграції різнорідних факторів – технічних, організаційних і поведінкових – у спільну аналітичну базу для подальшого моделювання сценаріїв, виявлення критичних ланцюгів атак і формування оптимальних стратегій реагування.

Ризик кожного сценарію обчислюється як:

$$R_i(t) = P(T_i \cap V_i) \cdot I(A_i) \cdot (1 - E(C_i)), \quad (2)$$

де $P(T_i \cap V_i)$ – ймовірність реалізації загрози через конкретну уразливість;

$I(A_i)$ – критичність активу;

$E(C_i)$ – ефективність застосованих контрзаходів.

Формула відображає багаторівневу взаємодію між елементами системи безпеки: загрозами, уразливостями та механізмами захисту. Коефіцієнт $I(A_i)$ підсилює внесок найкритичніших активів, тоді як множник $(1 - E(C_i))$ враховує ступінь зниження ризику завдяки наявним контролям [6; 14]. Таким чином, (2) дозволяє виконати кількісне оцінювання ризику в динамічній системі, відображаючи як ймовірність реалізації атаки, так і її потенційний вплив на бізнес-процеси. Цей вираз є основою для подальшої нормалізації ризиків і побудови агрегованої системної оцінки.

Для розділення складових ймовірності у (2) використовується декомпозиція:

$$P(T_i \cap V_i) = P(T_i|V_i) \cdot P(V_i), \quad (3)$$

що дає змогу окремо оновлювати оцінки уразливостей і загроз – наприклад, на основі результатів сканування, телеметрії або аналітики SOC. Такий підхід спрощує адаптацію моделі до змін у середовищі безпеки, дозволяючи незалежно оновлювати параметри загроз $P(T_i|V_i)$ та уразливостей $P(V_i)$. Це особливо важливо для систем, що працюють у режимі реального часу, де частота виявлення нових уразливостей та появи атак постійно зростає [2-4; 8; 15]. Крім того, формула (3) забезпечує можливість інтеграції з байєсівськими або нечіткими моделями оцінки ризику, створюючи основу для побудови динамічних сценаріїв розвитку інцидентів.

Агрегована ефективність множини контрзаходів визначається як:

$$E(C_i) = 1 - \prod_{k \in C_i}(1 - \eta_k u_k), \ 0 \le \eta_k, u_k \le 1, \quad (4)$$

де η_k – питомий вплив (якість) контрзаходу k;

u_k – рівень його задіяння (активації) в системі захисту [7; 12; 14].

Вираз описує інтегральний ефект множини незалежних контрзаходів, які спільно впливають на зменшення ризику реалізації загроз.

Модель базується на принципі комплементарності, коли ефективність усієї системи зростає навіть при частковому підвищенні ефективності окремих контролів [15]. Якщо хоча б один контрзахід спрацьовує на 100 %, агрегована ефективність $E(C_i)$ наближа-

ється до одиниці, що означає повне блокування ризику. Формула (4) узгоджується з рівнянням (2), адже підвищення $E(C_i)$ прямо зменшує величину ризику $R_i(t)$, забезпечуючи нелінійний кумулятивний ефект при додаванні додаткових механізмів захисту.

Для порівняння різних сценаріїв використовується нормований показник:

$$\hat{R}_i = \frac{R_i(t)}{R_{max}},\ \hat{R}_i \in [0;1], \tag{5}$$

який характеризує відносний рівень ризику від повної стійкості (дорівнює 0) до критичного стану (дорівнює 1). Такий підхід забезпечує уніфіковану шкалу для порівняння станів різних активів або сценаріїв, незалежно від їхньої абсолютної величини ризику [7; 9]. Нормалізація дозволяє оцінювати не лише поточний рівень загроз, але й відстежувати динаміку їх зміни в часі – наприклад, унаслідок появи нових уразливостей або впровадження додаткових контрзаходів. Значення $\hat{R}_i$, що наближається до 1, свідчить про критичну вразливість активу, тоді як показник, близький до 0, демонструє ефективність існуючих механізмів захисту. Таким чином, формула (5) створює основу для подальшої агрегації ризиків та оптимізації політики безпеки підприємства.

Інтегральний системний ризик обчислюється як:

$$R_{sys}(t) = \sum_i a_i \hat{R}_i(t),\ a_i \geq 0,\ \sum_i a_i = 1, \tag{6}$$

де a_i – вагові коефіцієнти пріоритетності активів або сценаріїв, що відображають їхню критичність у бізнес-процесах. Цей вираз узагальнює індивідуальні ризики $\hat{R}_i(t)$, інтегруючи їх у єдину метрику, що характеризує поточний стан захищеності всієї системи. Коефіцієнти a_i можуть визначатися на основі важливості активів у виробничому циклі, рівня їх підключення до інших компонентів або наслідків потенційної компрометації [7; 9; 11-12]. Таким чином, формула (6) дозволяє перетворити множину локальних оцінок ризику на стратегічний показник, який використовується для ухвалення управлінських рішень, ранжування загроз та формування політики пріоритетного захисту об'єктів критичної інфраструктури.

Для валідації запропонованого підходу проведено порівняння з трьома орієнтирами: статичним ризик-скорингом, моделлю з фіксованим порогом спрацювання та класичними алгоритмами машинного навчання, що не враховують графові зв'язки між активами, загрозами й контрзаходами. Ефективність системи оцінювалася за сукупністю кількісних метрик – MAE, RMSE, R^2, ROC-AUC, PR-AUC, F1, а також за середнім часом виявлення, частотою хибних спрацьовувань і затримкою чи пропускною здатністю в режимі реального часу. Такий комплекс показників забезпечує всебічну оцінку якості функціонування системи, охоплюючи точність прогнозування, своєчасність реагування та операційну ефективність в умовах динамічних кіберзагроз. Конфігурація моделей, включно з вікном спостереження, розміром рекурентних шарів, швидкістю навчання та пакетом обробки, зафіксована у внутрішньому профілі налаштувань і може бути відтворена відповідно до описаної послідовності етапів. Час тренування та інференсу контролювався з метою забезпечення інтеграції системи в потоки обробки даних, наближені до реального часу, що гарантує її практичну придатність у середовищах оперативного моніторингу безпеки.

Для візуалізації взаємозв'язків між елементами системи формується орієнтований граф ризику:

$$G = (N, E), \tag{7}$$

де $N = \{A, T, V, C\}$ – множина вузлів (активи, загрози, уразливості, контрзаходи), $E = \{(T, V), (V, A), (C, V)\}$ – множина орієнтованих зв'язків між ними. Такий граф відображає структуру взаємозалежностей між об'єктами критичної інфраструктури та дозволяє побудувати причинно-наслідкові ланцюги поширення ризику [6; 9; 16]. Кожне ребро вказує

напрям впливу – від загрози до уразливості, від уразливості до активу або від контрзаходу до уразливості, що дозволяє відстежувати як еволюцію потенційних атак, так і ефект застосованих захисних заходів. У такий спосіб граф G є базовою структурою для подальшого обчислення показників критичності та моделювання ланцюгових атак, забезпечуючи наочне представлення ризикових взаємозв'язків у системі.

Сумарна критичність системи розраховується як:

$$K(G) = \sum_{(i,j)\in E} w_{ij} \cdot R_j, \quad (8)$$

де w_{ij} – вага ребра, що визначає силу впливу між двома елементами графа;

R_j – ризик, асоційований із вузлом j.

Формула (8) дозволяє оцінити загальний вплив взаємозалежностей між компонентами системи безпеки, враховуючи як силу зв'язків між елементами, так і величину індивідуального ризику [11]. Якщо у системі існують вузли з високим рівнем ризику, що мають велику кількість зв'язків або високу вагу w_{ij}, їхній внесок у сумарну критичність $K(G)$ буде значним. Таким чином, рівняння (8) допомагає визначати вузли, які є «вузькими місцями» безпеки – тобто ті елементи, через які ризик найшвидше поширюється мережею, що робить їх пріоритетними для захисту та моніторингу.

Для аналізу складних багатокрокових або «ланцюгових» атак використовується показник ризику уздовж шляху:

$$R_p = \left(\prod_{(u\to v)\in p} w_{uv}\right) \cdot I(A_{end}),\ p\text{: шлях у } G, \quad (9)$$

де добуток ваг w_{uv} відображає сукупну проникність між вузлами графа вздовж шляху атак p;

$I(A_{end})$ – критичність кінцевого активу, до якого веде цей шлях.

Формула (9) дозволяє змоделювати каскадне поширення атаки через послідовні залежності між вразливими компонентами системи. Якщо хоча б одна ланка шляху має низьку проникність (малий w_{uv}), то загальний ризик R_p істотно зменшується, що узгоджується з логікою багаторівневого захисту [10]. У контексті графової моделі це дає змогу не лише оцінити ризик окремих вузлів, а й визначити критичні шляхи поширення загроз, які становлять найбільшу небезпеку для об'єкта критичної інфраструктури [5; 13]. Таким чином, показник R_p використовується для кількісного аналізу каскадних ефектів та оцінювання потенційного впливу складних атакових ланцюгів у системі.

Еволюція ризику у графі описується динамічним рівнянням:

$$r_{t+1} = \sigma(\mathcal{A}_t r_t + b - Te_t), \quad (10)$$

де r_t – вектор вузлових ризиків у момент часу t;

$\mathcal{A}_t$ – матриця ваг зв'язків між вузлами графа (активами, загрозами, уразливостями);

e_t – вектор ефективностей активних контрзаходів;

T – діагональна матриця сили їхнього впливу;

$\sigma(\cdot)$ – нелінійна стискуюча функція, наприклад логістична.

Рівняння описує, як ризик на кожному вузлі графа змінюється під впливом взаємодій між елементами системи та дією захисних механізмів. Доданок $\mathcal{A}_t r_t$ моделює передачу ризику між вузлами (наприклад, коли компрометація одного активу впливає на інші), а термін Te_t зменшує загальний ризик залежно від ефективності активних контрзаходів. Нелінійна функція $\sigma(\cdot)$ обмежує значення ризику у допустимому діапазоні [0,1], що забезпечує стабільність моделі та запобігає її розходженню при моделюванні довготривалих сценаріїв [15, 16]. Таким чином, формула (10) формалізує динамічну поведінку системи ризиків у часі, узгоджуючи її з попередніми співвідношеннями (7)-(9) і створюючи основу для прогнозного керування захищеністю об'єктів критичної інфраструктури.

Графік на рис. 1 відображає зміну рівня ризику r_t для п'яти вузлів системи у часі відповідно до рекурентної моделі $r_{t+1} = \sigma(\mathcal{A}_t r_t + b - Te_t)$. Взаємодія між вузлами визначається матрицею впливів $\mathcal{A}_t$, а ефективність контрзаходів – матрицею T. Криві показують, як ризик стабілізується після початкових коливань, демонструючи різні швидкості затухання залежно від локальної структури взаємодій та впливу параметра σ.

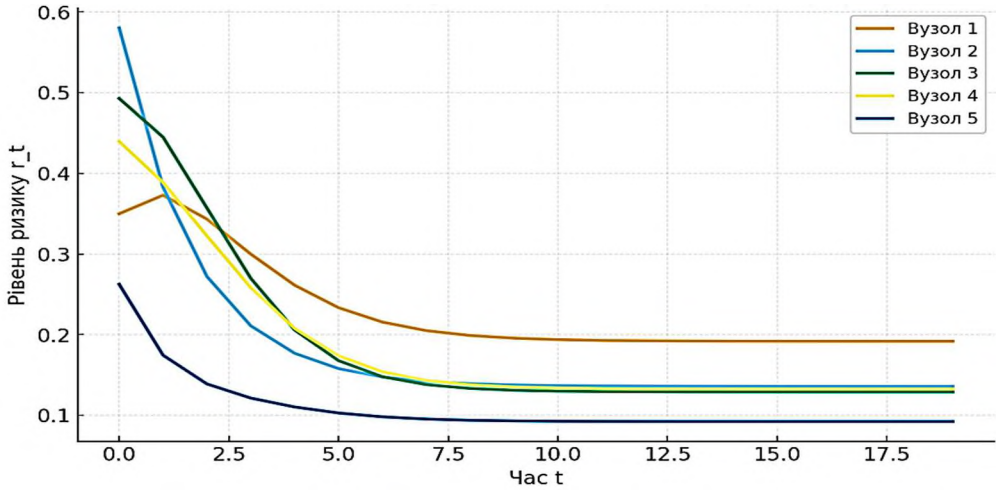


Рис. 1. Динаміка ризику у часі для вузлів графа

Джерело: розроблено автором.

Архітектура системи реалізована у вигляді трирівневої моделі, де кожен рівень виконує власні функції та взаємодіє з іншими через чітко визначені інтерфейси потоків даних, представлених на рис. 2.

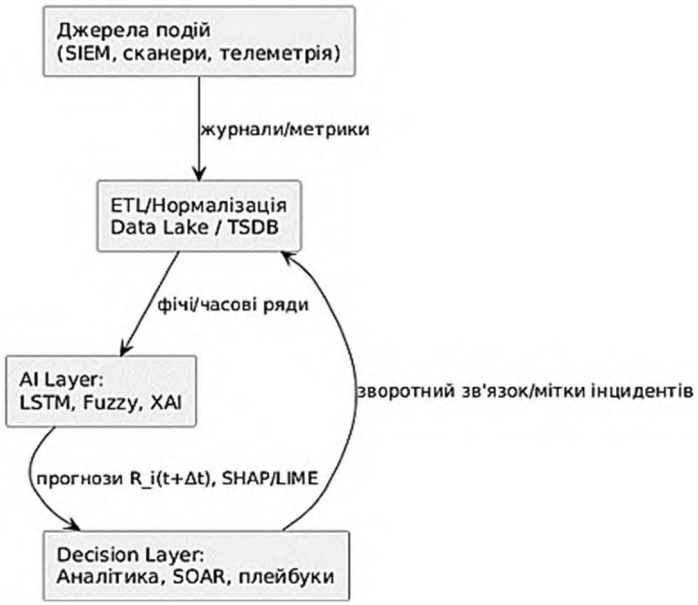


Рис. 2. Схема потоків даних інтелектуальної системи сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури

Джерело: розроблено автором.

Data Layer забезпечує первинну обробку інформаційних потоків, які надходять із різних джерел – журналів подій безпеки (SIEM), результатів сканування уразливостей, систем моніторингу інфраструктури (ICS/SCADA), мережевої телеметрії та логів хостових агентів [14]. На цьому рівні здійснюється збирання, уніфікація, очищення та нормалізація даних за допомогою механізмів ETL (Extract–Transform–Load). Усі події зберігаються

у сховищі типу Data Lake або Time Series Database, що дозволяє виконувати як ретроспективний, так і потоковий аналіз. Data Layer також відповідає за синхронізацію даних у реальному часі, їхню категоризацію за типами загроз і уразливостей та передає нормалізовані ознаки безпеки до рівня штучного інтелекту. AI Layer виконує аналітичну та прогнозну функції, використовуючи моделі машинного навчання, нечіткої логіки та пояснюваного штучного інтелекту для оцінки поточного й майбутнього рівня ризику [5; 8; 15]. На цьому рівні здійснюється побудова часових прогнозів, визначення ймовірності реалізації загроз і формування рекомендацій щодо пріоритетності контрзаходів. Отримані результати передаються до Decision Layer, який інтегрує аналітичні висновки в систему підтримки рішень, забезпечуючи автоматизоване реагування, оптимізацію ресурсів і формування сценаріїв реагування в межах SOC/SIEM/SOAR.

Потоки починаються з джерел подій (SIEM, сканери, телеметрія), звідки журнали та метрики надходять до модуля ETL/Нормалізація, де здійснюється очищення, уніфікація та передавання даних у сховище Data Lake / TSDB [9]. AI Layer виконує основну аналітичну й прогнозну функцію системи. Його ядром є нейронна мережа LSTM, яка аналізує часові ряди даних і визначає прогнозований рівень ризику $R_i(t + \Delta t)$ для кожного активу або сценарію.

Паралельно працює модуль нечіткої логіки (Fuzzy Logic Module), що опрацьовує експертні або напівавтоматичні оцінки параметрів безпеки – наприклад, рівень критичності активів, імовірність реалізації загроз, ефективність контрзаходів – і переводить ці оцінки у числову форму через механізми фазифікації, агрегації та дефазифікації. Додатково вбудований Explainable Artificial Intelligence (XAI) модуль інтерпретує результати прогнозу, пояснюючи, які вхідні фактори найбільше вплинули на оцінку ризику.

Для цього використовуються методи SHAP, LIME та аналітика важливості ознак, що підвищує довіру до результатів і спрощує їх використання аналітиками центрів моніторингу безпеки. Таким чином, AI Layer виконує роль інтелектуального ядра, яке перетворює масиви сирих даних у прогнозні оцінки та пояснення для прийняття рішень. Decision Layer є рівнем взаємодії з користувачем і відповідає за інтеграцію результатів аналітики у процес управління безпекою [16]. На цьому етапі система виконує візуалізацію графа ризику (7), що демонструє зв'язки між активами, загрозами, уразливостями та контрзаходами [15]. Граф відображає не лише поточний стан безпеки, але й динаміку зміни ризиків у часі. У модулі аналітики здійснюється оцінка трендів ризику, порівняння сценаріїв, побудова heatmap-карт критичності та ранжування активів за ступенем уразливості. Результати автоматично передаються до SOAR-компонента (Security Orchestration, Automation and Response), який формує рекомендації або плейбуки дій, оптимізуючи порядок реагування на інциденти з урахуванням доступного бюджету та ресурсів [6; 10]. Отже, Decision Layer замикає цикл управління – від збору даних до реалізації автоматизованих контрзаходів.

Отже, модуль нечіткої логіки забезпечує обробку невизначеностей і наближених оцінок, дозволяючи системі працювати навіть за неповних або суперечливих даних. Його поєднання з XAI-модулем створює прозорий механізм прийняття рішень, у якому кожне прогнозоване значення ризику може бути обґрунтовано на рівні факторного внеску. Такий підхід підвищує довіру аналітиків до результатів моделювання та спрощує аудит дій системи у контексті стандартів безпеки. У комплексі ці модулі формують когнітивне ядро AI-рівня, що забезпечує пояснюваність, адаптивність і стійкість оцінки ризику в динамічному середовищі загроз.

Взаємодія між трьома рівнями здійснюється за принципом безперервного циклу: Data Layer постачає актуальні дані, AI Layer генерує прогноз і пояснення, а Decision Layer забезпечує прийняття рішень, результати яких повертаються у вигляді нових даних і тригерів для корекції моделі [8; 14]. Така архітектура підтримує адаптивність, масштабованість і самонавчання системи, що є критично важливим для захисту об'єктів критичної

інфраструктури в умовах динамічних кіберзагроз. Завдяки модульній побудові забезпечується можливість гнучкого оновлення окремих компонентів без переривання роботи всієї системи. AI-модуль виконує прогнозування на основі часових рядів та формує пояснювані рекомендації для оператора, що підвищує прозорість процесу прийняття рішень. Decision Layer інтегрується з SOC/SIEM-платформами, автоматизуючи реагування та корекцію політик безпеки в реальному часі. Зворотний зв'язок між рівнями гарантує поступове вдосконалення моделі на основі накопиченого досвіду та змін у середовищі загроз, формуючи основу для інтелектуального управління ризиками.

На рис. 3 показано, як архітектура реалізує узгоджений потік даних між трьома рівнями, де кожен елемент виконує власну роль у формуванні цілісного контуру управління ризиками.

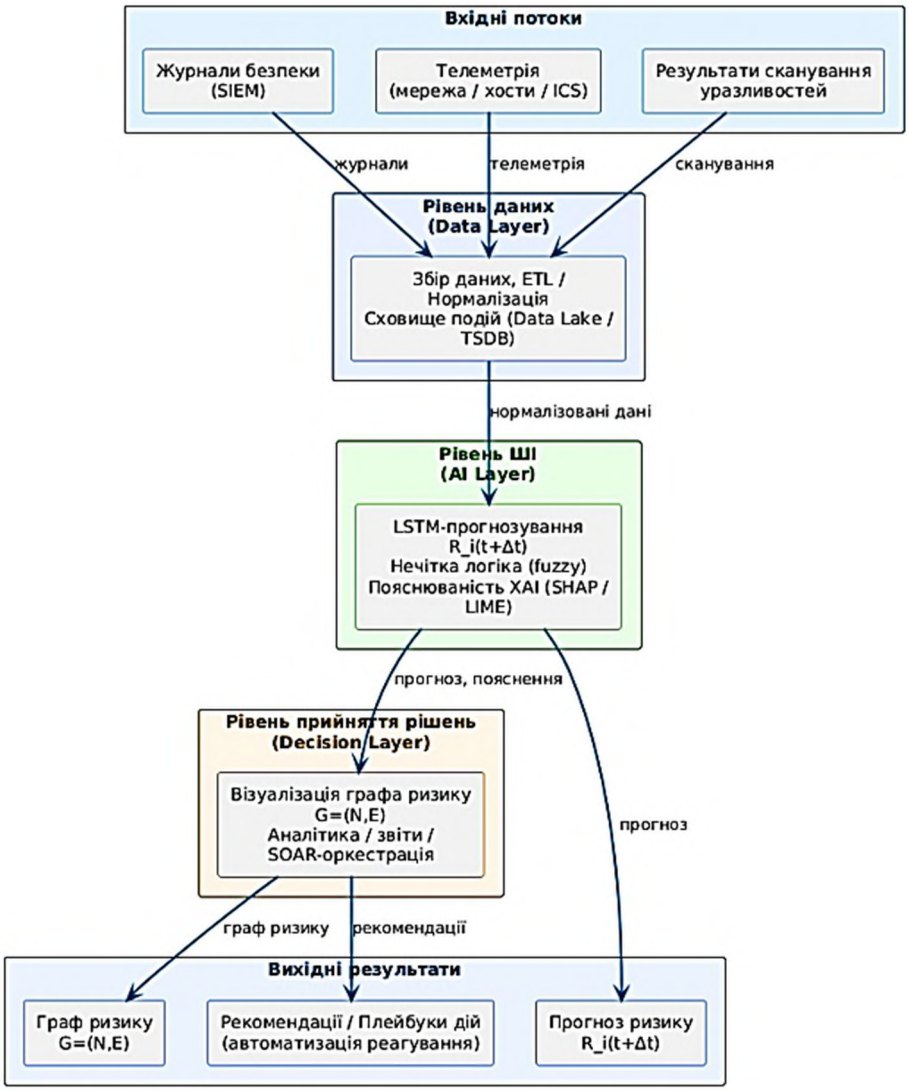


Рис. 3. Трирівнева архітектура інтелектуальної системи сценарного моделювання
Джерело: розроблено автором.

У центрі зображено три логічні шари системи – Data, AI та Decision, які об'єднані пунктирними лініями, що символізують обмін інформацією в режимі реального часу. Ліворуч показано вхідні джерела подій (журнали, телеметрія, результати сканувань), праворуч – результати аналізу, зокрема граф ризику, прогнозовані значення та рекомендації для реагування [5; 17]. Діаграма наочно демонструє, що система функціонує як замкну-

тий аналітичний контур, у якому результати прогнозів і рекомендацій Decision Layer можуть повторно впливати на Data Layer, формуючи механізм самонавчання та адаптації до змін у середовищі загроз.

Процес сценарного моделювання реалізується в кілька етапів: збір і попередня обробка даних D_t, визначення критичних активів і уразливостей, побудова прогнозної моделі за допомогою функції [2; 6]:

$$R_i(t+\Delta t) = f_\theta(D_t, A_i, T_i, V_i), \tag{11}$$

де f_θ – параметризована нейромережа, навчена на даних D_t. Вона враховує історичні залежності, взаємодії активів і поточні загрози, формуючи прогноз ризику для майбутнього моменту часу $t+\Delta t$. Завдяки використанню рекурентної структури (зокрема, LSTM або GRU-блоків) модель здатна відстежувати довготривалі залежності у поведінці системи безпеки та виявляти приховані тренди у зміні ризикових показників [5; 8; 15]. Такий підхід забезпечує не лише кількісне прогнозування, а й виявлення закономірностей, що передують виникненню критичних інцидентів, створюючи основу для проактивного реагування в межах системи кіберзахисту.

Ймовірнісний характер прогнозу подається як [15]:

$$R_i(t+\Delta t) \sim \mathcal{N}(\mu_i, \sigma_i^2),\ \mu_i = f_\theta(D_t, A_i, T_i, V_i),\ \sigma_i^2 = g_\theta(D_t, A_i, T_i, V_i), \tag{12}$$

де функція g_θ повертає дисперсію невизначеності прогнозу. Це забезпечує оцінку довіри до прогнозованого ризику та використовується далі для адаптивного налаштування порогів реагування. Крім того, значення μ_i відображає очікуваний рівень ризику для активу в майбутній момент часу, тоді як σ_i^2 характеризує ступінь коливань або нестабільності середовища [3; 10]. Такий підхід дозволяє системі розрізняти стабільні сценарії від потенційно небезпечних, коли зростає дисперсія прогнозу, що є індикатором підвищеної невизначеності або появи нових типів загроз.

Оцінка умовної ймовірності загрози оновлюється за правилом Байєса:

$$P_t(\ T_i|\ V_i) = \frac{\mathcal{L}(E_t|T_i, V_i)\ P_{t-1}(T_i|\ V_i)}{Z_t}, \tag{13}$$

де $\mathcal{L}$ – правдоподібність отриманих свідчень E_t;

Z_t – нормувальний коефіцієнт [11; 13].

Цей механізм дозволяє системі адаптивно оновлювати ризиковий профіль у реальному часі. Оновлення за правилом Байєса забезпечує динамічне врахування нових подій і сигналів телеметрії без необхідності повного перенавчання моделі. Це дозволяє системі коригувати поточні оцінки загроз при надходженні нових індикаторів компрометації або зміні контексту середовища [10; 15]. Таким чином, модель підтримує безперервну адаптацію до мінливих умов кіберзагроз, зберігаючи актуальність прогнозів ризику в реальному часі.

Для навчання моделі використовується функція втрат:

$$L = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(R_i^{true} - R_i^{pred}\right)^2, \tag{14}$$

яка мінімізує похибку прогнозу. Додатково проводиться моніторинг метрик MAE, RMSE та коефіцієнта детермінації R^2 для оцінки точності передбачень на валідаційних вибірках. Для підвищення збіжності процесу оптимізації застосовуються адаптивні алгоритми градієнтного спуску, такі як Adam і RMSProp, а також регулярне перезапускання навчання з випадковою ініціалізацією ваг [14]. Валідаційні тести виконуються на основі синтетичних і реальних SOC-логів, що забезпечує перевірку узагальнювальної здатності моделі на різних сценаріях кіберзагроз.

Для підвищення стабільності додано регуляризацію Тихонова:

$$L_{total} = L + \lambda\|\theta\|_2^2, \tag{15}$$

що запобігає перенавчанню та стабілізує параметри моделі [8]. Додатково під час навчання застосовувались крос-валідація k-fold і раннє зупинення за метрикою валідаційної

похибки з адаптивним зменшенням швидкості навчання. Гіперпараметри моделі добиралися методом байєсівської оптимізації, а ознаки проходили нормування та регулярний контроль на мультиколінеарність [6; 11; 17]. Для підвищення стійкості використовували балансування класів/ваги втрат для рідкісних інцидентів, обрізання градієнтів і калібрування ймовірностей (temperature scaling) для коректної інтерпретації ризику.

На етапі ухвалення рішень система виконує оптимізацію контрзаходів за обмеженого бюджету:

$$\min_{x\in\{0,1\}^m} R'_{sys}(t) = \sum_i a_i \hat{R}'_i(t) \quad s.t. \quad \sum_{i=1}^{n} c_k\, x_k \le B, \tag{16}$$

де a_i – вагові коефіцієнти, що відображають важливість активу або сценарію;

$\hat{R}'_i(t)$ – оновлений нормований ризик після застосування обраних заходів;

c_k – вартість реалізації кожного контрзаходу;

B – загальний бюджет, який не можна перевищити;

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ – бінарний вектор вибору контрзаходів.

Нові значення ризику $\hat{R}'_i(t)$ визначаються через ефективність контрзаходів $E(C_i \cup \{k : x_k = 1\})$. Таким чином, завдання (16) формалізує процес мінімізації залишкового ризику за наявних ресурсів і реалізується на рівні Decision Layer.

Для задачі мінімізації залишкового ризику за бюджетних обмежень використано детермінований розв'язувач з евристичним теплим стартом; при зростанні розмірності застосовується жадібна стратегія наближення з гарантованою зупинкою за часом. Такий підхід забезпечує стабільний компроміс між якістю рішень і часовими вимогами SOC-процесів.

Діаграма на рис. 4 ілюструє компроміс між залишковим ризиком $R'_{sys}(t)$ та вартістю реалізації контрзаходів B. Кожна точка відповідає можливому набору рішень x у задачі оптимізації, де мінімізується ризик за обмеженого бюджету. Виділена «робоча точка» відображає оптимальний баланс між ефективністю та витратами, що визначає доцільну стратегію реалізації заходів безпеки в системі критичної інфраструктури.

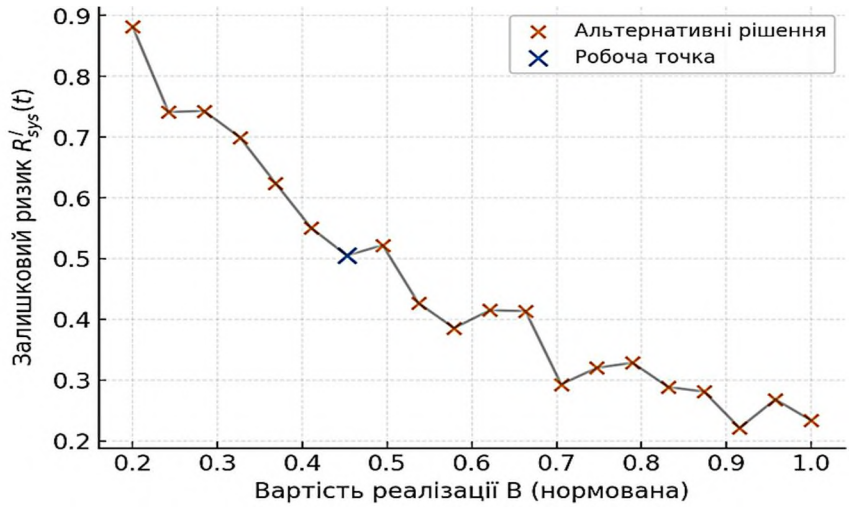


Рис. 4. Парето-фронт «ризик ↓ – вартість ↑» для сімейства рішень x

Джерело: розроблено автором.

Після оптимізації система визначає адаптивні пороги спрацьовування:

$$\tau_i = \tau_0 + \beta\sigma_i, \text{ спрацьовування, якщо } R_i(t) \ge \tau_i\,, \tag{17}$$

де τ_0 – базовий рівень порогу;

β – коефіцієнт чутливості системи до невизначеності;

σ_i – невизначеність прогнозу [8].

Підвищення порогу при великій дисперсії дозволяє знизити кількість хибних спрацьовувань SOC/AI-модуля [12-13, 15]. Таким чином, послідовність формул (1) - (17) описує цілісний цикл функціонування інтелектуальної системи: від формалізації ризику та графового моделювання до прогнозування, оптимізації контрзаходів і адаптивного реагування. Це забезпечує самоналаштовність та підвищує ефективність захисту об'єктів критичної інфраструктури в умовах динамічних кіберзагроз.

На рис. 5 ($а$) показано залежність між бюджетом B та залишковим системним ризиком $R'_{sys}(t)$: із зростанням бюджету ризик зменшується, а позначені точки $x^{(i)}$ відображають оптимальні набори контрзаходів у межах ресурсних обмежень. На рис. 5 ($б$) зображено вплив параметра масштабування порогу β на ймовірності хибних (FPR) і правильних (TPR) спрацьовувань при формулі $\tau_i = \tau_0 + \beta\sigma_i$. Зі зростанням β зменшується кількість хибних спрацьовувань, що демонструє адаптивність порогів реагування в AI-модулі оцінки ризику.

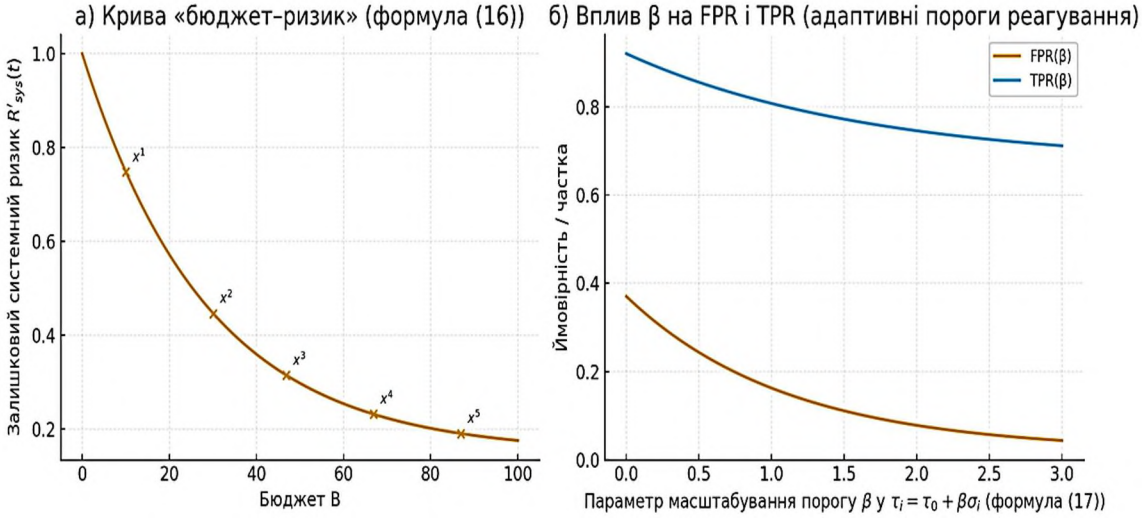


Рис. 5. Компроміс «бюджет-ризик» та вплив β на пороги реагування
Джерело: розроблено автором.

Розроблена система може бути інтегрована в наявну інфраструктуру центрів моніторингу безпеки (SOC) через стандартні канали обміну даними з SIEM-платформами, сховищами часових рядів (TSDB) та системами SOAR для автоматизації реагування. Інтелектуальні модулі формують аналітичні звіти, алерти та рекомендації з узгодженим SLA-часом реагування. Архітектура підтримує поетапне впровадження без зупинки поточних бізнес-процесів, що дає змогу поступово розширювати функціонал системи та підвищувати рівень кіберстійкості підприємства.

У процесі розроблення враховувались можливі обмеження моделі, зокрема дисбаланс класів подій, дрейф концепції у часових рядах і шум сенсорних даних. Для пом'якшення цих факторів застосовувалося ребалансування вибірок, моніторинг дрейфу з автоматичними тригерами перенавчання та перевірки консистентності ознак під час оновлення даних. Основним обмеженням є відсутність публічних сирих даних, однак подані процедурні описи достатні для відтворення результатів на будь-яких сумісних журналах безпеки.

Усі журнали подій, використані для тестування, проходили етап анонімізації та агрегування, що виключає можливість ідентифікації реальних об'єктів або користувачів. Доступ до даних регламентовано ролями з багаторівневою автентифікацією. Передбачено аудит рішень штучного інтелекту й захист від отруєння даних (data poisoning) через перевірку джерел і ізоляцію підозрілих потоків, що забезпечує прозорість та надійність функціонування системи.

Отримані результати підтвердили, що запропонована система забезпечує автоматизовану генерацію сценаріїв, динамічне оновлення ризикових профілів і пояснюваність результатів через XAI-аналіз. Подальший розвиток передбачає створення цифрових двійників об'єктів критичної інфраструктури з вбудованими AI-модулями оцінки ризику, застосування мультиагентних моделей для імітації поведінки атак і розширення механізмів XAI для візуалізації впливу кожного параметра на інтегральний рівень загрози.

Висновки. У статті розроблено та представлено інтелектуальну систему сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури, що поєднує методи машинного навчання, нечіткої логіки, графових структур і пояснюваного штучного інтелекту (XAI-модуля). Запропонована математична модель дозволяє формалізувати взаємозв'язки між активами, загрозами, уразливостями та контрзаходами, а також враховувати часову динаміку ризиків. Завдяки цьому забезпечується адаптивна оцінка стану захищеності в реальному часі, прогнозування сценаріїв розвитку інцидентів і вибір оптимальних контрзаходів з урахуванням обмежених ресурсів.

Експериментальні результати продемонстрували здатність системи автоматично оновлювати профіль ризику, мінімізувати похибку прогнозування та підтримувати пояснюваність результатів для аналітиків SOC через XAI-модуль. Розроблена архітектура може бути інтегрована у цифрові двійники кіберзахисту або центри моніторингу безпеки критичної інфраструктури, що підвищує рівень кіберстійкості та оперативність реагування на інциденти.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення функціоналу системи шляхом інтеграції мультиагентних моделей поведінки атак, удосконалення механізмів байєсівського оновлення знань і створення візуальних XAI-інтерфейсів для аналізу впливу окремих параметрів на інтегральний рівень загроз. Реалізація таких підходів сприятиме формуванню нового покоління інтелектуальних систем кіберзахисту, здатних до самонавчання, самокорекції та випереджувального реагування в умовах динамічних кіберзагроз.

Список використаних джерел

1. Boamah, F. A., Jin, X., Senaratne, S., & Perera, S. (2025). *AI-driven risk identification model for infrastructure projects: Utilising past project data. Expert Systems with Applications*, *233*, 127891. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127891.

2. Ajayi, A., Akerele, J., Odio, P., Collins, A., Babatunde, G., & Mustapha, D. (2025). *Using AI and machine learning to predict and mitigate cybersecurity risks in critical infrastructure. Journal of Information Security Research*, *21*, 204-224. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14069.49120.

3. Yigit, Y., Ferrag, M. A., Ghanem, M. C., Sarker, I. H., Maglaras, L. A., Chrysoulas, C., Moradpoor, N., Tihanyi, N., & Janicke, H. (2025). *Generative AI and LLMs for critical infrastructure protection: Evaluation benchmarks, agentic AI, challenges, and opportunities. Sensors*, *25*(6), 1666. https://doi.org/10.3390/s25061666.

4. Paulraj, J., Raghuraman, B., Gopalakrishnan, N., & Otoum, Y. (2025). *Autonomous AI-based cybersecurity framework for critical infrastructure: Real-time threat mitigation. arXiv preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.07416.

5. Arif, M. H., Rabby, H. R., Nadia, N. Y., Tanvir, M. I. M., & Masum, A. A. (2025). *AI-driven risk assessment in national security projects: Investigating machine learning models to predict and mitigate risks in defense and critical infrastructure projects. Journal of Computer Science and Technology Studies*, *7*(2), 71-85. https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.2.6.

6. Гречанінов, В. Ф. (2025). *Моделі та технології інтелектуального захисту інформаційних систем критичної інфраструктури для підвищення стійкості. Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, *1*(29), 877-896. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.948.

7. Hulak, H. M., Zhyltsov, O. B., Kyrychok, R. V., Korshun, N. V., & Skladannyi, P. M. (2023). *Enterprise information and cyber security*. Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

8. Mohamed, N. (2025). *Artificial intelligence and machine learning in cybersecurity: A deep dive into state-of-the-art techniques and future paradigms. Knowledge and Information Systems*, *67*, 6969-7055. https://doi.org/10.1007/s10115-025-02429-y.

9. Kostiuk, Y. V., Skladannyi, P. M., Bebeshko, B. T., Khorolska, K. V., Rzaieva, S. L., & Vorokhob, M. V. (2025). *Information and communication systems security*. Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

10. Govea, J., Gaibor-Naranjo, W., & Villegas-Ch, W. (2024). *Transforming cybersecurity into critical energy infrastructure: A study on the effectiveness of artificial intelligence. Systems*, *12*(5), 165. https://doi.org/10.3390/systems12050165.

11. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Samoilenko, Y., Khorolska, K., Bebeshko, B., & Sokolov, V. (2025). *A system for assessing the interdependencies of information system agents in information security risk management using cognitive maps.* In *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks* (Vol. 3925, pp. 249-264).

12. Kostiuk, Y. V., Skladannyi, P. M., Hulak, H. M., Bebeshko, B. T., Khorolska, K. V., & Rzaieva, S. L. (2025). *Information security systems* [Textbook]. Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

13. Munmun, Z., Hossain, M. D., Jahan, I., Akther, S., Masum, A., & Rabby, H. (2025). *AI-driven project risk management: Leveraging artificial intelligence to predict, mitigate, and manage project risks in critical infrastructure and national security projects. Journal of Computer Science and Technology Studies*, *7*(2), 71-85. https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.2.6.

14. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., Zhyltsov, O., & Ivanichenko, Y. (2025). *Effectiveness of information security control using audit logs.* In *Proceedings of the Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025)* (pp. 524-538).

15. Islam, S., Basheer, N., & Papastergiou, S. (2025). *Intelligent dynamic cybersecurity risk management framework with explainability and interpretability of AI models for enhancing security and resilience of digital infrastructure. Journal of Reliable Intelligent Environments*, *11*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s40860-025-00253-3.

16. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Rzaieva, S. (2025). *Intelligent system for simulation modeling and research of information objects.* In *Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025)*, co-located with the *15th International Scientific and Practical Programming Conference (UkrPROG 2025)* (Vol. 4053, pp. 237-251).

17. Abramov, V., Astafieva, M., Boiko, M., Bodnenko, D., Bushma, A., Vember, V., Hlushak, O., Zhyltsov, O., Ilich, L., Kobets, N., Kovaliuk, T., Kuchakovska, H., Lytvyn, O., Lytvyn, P., Mashkina, I., Morze, N., Nosenko, T., Proshkin, V., Radchenko, S., & Yaskevych, V. (2021). *Theoretical and practical aspects of the use of mathematical methods and information technology in education and science.* https://doi.org/10.28925/9720213284km.

References

1. Boamah, F. A., Jin, X., Senaratne, S., & Perera, S. (2025). *AI-driven risk identification model for infrastructure projects: Utilising past project data. Expert Systems with Applications*, *233*, 127891. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127891.

2. Ajayi, A., Akerele, J., Odio, P., Collins, A., Babatunde, G., & Mustapha, D. (2025). *Using AI and machine learning to predict and mitigate cybersecurity risks in critical infrastructure. Journal of Information Security Research*, *21*, 204-224.

3. Yigit, Y., Ferrag, M. A., Ghanem, M. C., Sarker, I. H., Maglaras, L. A., Chrysoulas, C., Moradpoor, N., Tihanyi, N., & Janicke, H. (2025). *Generative AI and LLMs for critical infrastructure protection: Evaluation benchmarks, agentic AI, challenges, and opportunities. Sensors*, *25*(6), 1666. https://doi.org/10.3390/s25061666.

4. Paulraj, J., Raghuraman, B., Gopalakrishnan, N., & Otoum, Y. (2025). *Autonomous AI-based cybersecurity framework for critical infrastructure: Real-time threat mitigation. arXiv preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.07416.

5. Arif, M. H., Rabby, H. R., Nadia, N. Y., Tanvir, M. I. M., & Masum, A. A. (2025). *AI-driven risk assessment in national security projects: Investigating machine learning models to predict and mitigate risks in defense and critical infrastructure projects. Journal of Computer Science and Technology Studies*, *7*(2), 71-85. https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.2.6.

6. Hrechanynov, V. (2025). Models and technologies of intelligent protection of information systems of critical infrastructure for increasing resilience. [Modeli ta tekhnolohii intelektualnoho zakhystu informatsiinykh system krytychnoi infrastruktury dlia pidvyshchennia stiikosti.] *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika – Cybersecurity: Education, Science, Technology,* 1(29), 877-896. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.948.

7. Hulak, H. M., Zhyltsov, O. B., Kyrychok, R. V., Korshun, N. V., & Skladannyi, P. M. (2023). *Enterprise information and cyber security*. Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

8. Mohamed, N. (2025). *Artificial intelligence and machine learning in cybersecurity: A deep dive into state-of-the-art techniques and future paradigms. Knowledge and Information Systems*, *67*, 6969-7055. https://doi.org/10.1007/s10115-025-02429-y.

9. Kostiuk, Y. V., Skladannyi, P. M., Bebeshko, B. T., Khorolska, K. V., Rzaieva, S. L., & Vorokhob, M. V. (2025). *Information and communication systems security*. Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

10. Govea, J., Gaibor-Naranjo, W., & Villegas-Ch, W. (2024). *Transforming cybersecurity into critical energy infrastructure: A study on the effectiveness of artificial intelligence. Systems*, *12*(5), 165. https://doi.org/10.3390/systems12050165.

11. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Samoilenko, Y., Khorolska, K., Bebeshko, B., & Sokolov, V. (2025). *A system for assessing the interdependencies of information system agents in information security risk management using cognitive maps.* In *Cyber Hygiene & Conflict Management in Global Information Networks* (Vol. 3925, pp. 249-264).

12. Kostiuk, Y. V., Skladannyi, P. M., Hulak, H. M., Bebeshko, B. T., Khorolska, K. V., & Rzaieva, S. L. (2025). *Information security systems* [Textbook]. Kyiv: Borys Grinchenko Kyiv Metropolitan University.

13. Munmun, Z., Hossain, M. D., Jahan, I., Akther, S., Masum, A., & Rabby, H. (2025). *AI-driven project risk management: Leveraging artificial intelligence to predict, mitigate, and manage project risks in critical infrastructure and national security projects. Journal of Computer Science and Technology Studies*, *7*(2), 71-85. https://doi.org/10.32996/jcsts.2025.7.2.6.

14. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., Zhyltsov, O., & Ivanichenko, Y. (2025). *Effectiveness of information security control using audit logs.* In *Proceedings of the Workshop on Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025)* (pp. 524-538).

15. Islam, S., Basheer, N., & Papastergiou, S. (2025). *Intelligent dynamic cybersecurity risk management framework with explainability and interpretability of AI models for enhancing security and resilience of digital infrastructure. Journal of Reliable Intelligent Environments*, *11*(1), 12. https://doi.org/10.1007/s40860-025-00253-3.

16. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Sokolov, V., & Rzaieva, S. (2025). *Intelligent system for simulation modeling and research of information objects.* In *Proceedings of the 1st Workshop Software Engineering and Semantic Technologies (SEST 2025)*, co-located with the *15th International Scientific and Practical Programming Conference (UkrPROG 2025)* (Vol. 4053, pp. 237-251).

17. Abramov, V., Astafieva, M., Boiko, M., Bodnenko, D., Bushma, A., Vember, V., Hlushak, O., Zhyltsov, O., Ilich, L., Kobets, N., Kovaliuk, T., Kuchakovska, H., Lytvyn, O., Lytvyn, P., Mashkina, I., Morze, N., Nosenko, T., Proshkin, V., Radchenko, S., & Yaskevych, V. (2021). *Theoretical and practical aspects of the use of mathematical methods and information technology in education and science.* https://doi.org/10.28925/9720213284km.

Отримано 20.09.2025

UDC 004.056.5:004.89:005.8:519.876.5

Viktor Grechaninov

Associate Professor, Senior Researcher, Head of the Research Department
Institute for Problems of Mathematical Machines and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vgrechaninov@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6268-3204

INTELLIGENT SYSTEM FOR SCENARIO MODELING OF SECURITY ASSESSMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE OBJECTS

The urgency of the research arises from the growing sophistication and frequency of cyberattacks targeting critical infrastructure, where conventional static risk assessment techniques cannot reflect the dynamic interdependencies between assets, threats, vulnerabilities, and countermeasures. These challenges highlight the need for an intelligent and adaptive system capable of predicting, explaining, and mitigating evolving cyber risks in real time.

The problem addressed in this study lies in the absence of comprehensive models that integrate temporal forecasting, uncertainty quantification, and explainable decision-making within cybersecurity operations. Existing solutions are often static, fragmented, and incapable of generating adaptive risk scenarios or ensuring transparency in AI-driven reasoning. The main objective of the research is to develop an intelligent system for scenario modeling of security assessment for critical infrastructure objects, which provides dynamic evaluation of protection effectiveness and supports optimal resource allocation for risk mitigation.

The proposed model integrates machine learning, fuzzy logic, and graph theory to represent causal dependencies among security entities. The system architecture includes a data layer responsible for event aggregation and normalization, an AI layer using LSTM and XAI modules for forecasting and interpretability, and a decision layer for visualization and integration with SOC, SIEM, and SOAR platforms. Experimental results have shown improved accuracy of risk prediction, adaptive threshold adjustment, and significant reduction of false positives.

The conclusions emphasize that the developed system forms a comprehensive, explainable, and resource-efficient approach to cybersecurity risk management. It enables proactive protection, continuous self-learning, and transparency in evaluating defense performance. The research outcomes can enhance the cyber resilience of critical infrastructure and facilitate digital twin–based intelligent security monitoring.

Keywords: *risk assessment; scenario modeling; artificial intelligence; critical infrastructure; fuzzy logic; risk graph; machine learning; cybersecurity; digital twins.*

Fig.: 5. References: 17.

Гречанінов В. Ф. Інтелектуальна система сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 131-145. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-131-145.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-146-157
УДК 004.2

Володимир Вікторович Казимир[1], Андрій Іванович Роговенко[2], Костянтин Олександрович Ткаченко[3]

[1]доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: arogovenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4594-5692. **ResearcherID:** G-3926-2014

[3]магістр кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: kostiantintkachenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-0927-0080

МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДАНИМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У статті запропоновано метод розпізнавання акустичних сигналів на основі спектрального аналізу та нейронних мереж для детекції цільових об'єктів в умовах негативного співвідношення сигнал/завада. Досліджено специфічну задачу акустичної ідентифікації, коли цільовий сигнал має нижчий рівень потужності порівняно з фоновими завадами від джерела аналогічної природи. На основі попереднього аналізу гармонічної структури досліджуваних сигналів визначено частотний діапазон 700-850 Гц як оптимальний для розрізнення цільового та фонового компонентів. Розроблено кастомний аналізатор для вилучення 21 спектральної ознаки з обраного частотного діапазону з використанням часових вікон тривалістю 1 секунда з перекриттям 0,5 секунди. Запропоновано архітектуру повнозв'язної нейронної мережі з двома прихованими шарами для класифікації векторів ознак. Експериментальна валідація методу продемонструвала досягнення точності детекції 88 % при рівні хибних спрацьовувань 4 %. Метод забезпечує компактне представлення акустичної інформації та обчислювальну ефективність за рахунок фокусування на попередньо визначеному інформативному частотному діапазоні замість обробки повного спектра сигналу.

Ключові слова: *акустичне розпізнавання; спектральний аналіз; нейронні мережі; низький SNR; частотна селекція; векторні ознаки.*

Рис.: 8. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Розвиток технологій безпілотних літальних апаратів супроводжується зростанням їх застосування у цивільних та комерційних сферах, що одночасно створює нові виклики для забезпечення безпеки повітряного простору. Традиційні системи виявлення повітряних цілей, розроблені для великих пілотованих літальних апаратів, виявляються недостатньо адаптованими для детекції малорозмірних безпілотних об'єктів через їх низький радіолокаційний переріз розсіювання та здатність до польоту на низьких висотах [1].

Акустичні методи детекції набувають особливого значення в умовах, де радіолокаційні та оптичні системи мають обмеження. Водночас переважна більшість існуючих систем акустичного розпізнавання призначена для стаціонарних умов застосування з контрольованим акустичним середовищем [2]. Практичні потреби вимагають розробки систем детекції, здатних функціонувати на рухомих платформах, які самі є джерелами інтенсивних акустичних завад.

Постановка проблеми. Основною проблемою, яка розглядається у дослідженні, є розпізнавання акустичних сигналів в умовах, коли цільовий сигнал має нижчий рівень потужності порівняно з фоновими завадами від власної платформи детекції. Традиційні методи акустичного аналізу, що працюють з повним спектром сигналу або стандартними акустичними дескрипторами, виявляються неефективними за таких умов через домінування завадового компонента [3].

Існуючі підходи до акустичної детекції зосереджуються переважно на обробці широкосмугових сигналів із формуванням спектрограм великої розмірності, що вимагає значних обчислювальних ресурсів і не завжди забезпечує необхідну точність в умовах

© В. В. Казимир, А. І. Роговенко, К. О. Ткаченко, 2025

складної акустичної обстановки. Відсутність методів, орієнтованих на виділення вузьких інформативних частотних діапазонів, обмежує можливості створення компактних і ефективних систем детекції.

Додатковою проблемою є необхідність забезпечення оперативності обробки при мінімальних вимогах до обчислювальних ресурсів, що особливо актуально для мобільних платформ з обмеженим енергоспоживанням. Це вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів, здатних поєднувати детальний спектральний аналіз обраних частотних діапазонів із компактним представленням отриманих ознак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі акустичного розпізнавання сигналів характеризуються широким застосуванням методів глибинного навчання для розв'язання задач детекції та класифікації звукових об'єктів. Переважна більшість наукових праць з проблем акустичного розпізнавання сигналів зосереджується на використанні або методів спектрального аналізу [4], або нейромережевих підходів [5; 6; 7] як автономних рішень.

Водночас дослідження, спрямовані на розв'язання задач детекції та класифікації звукових об'єктів, характеризуються широким застосуванням методів глибинного навчання. Так, у роботі [5] розглянуто систему глибинного навчання для аналізу акустичних сигналів промислового обладнання. Автори здійснюють перетворення звукових сигналів у мел-спектрограми та застосовують нейромережну архітектуру DenseNet-169 для класифікації зображень спектрограм. Система забезпечила точність від 97,17 % до 99,87 % за різних рівнів шумових завад, що підтверджує доцільність підходу, заснованого на повному перетворенні аудіосигналу у візуальне представлення.

Дослідження акустичної детекції безпілотних літальних апаратів представлене в роботі [6], де здійснено порівняння трьох методів вилучення ознак: спектрограми, фільтрбанку (Fbank) та мел-частотних кепстральних коефіцієнтів (MFCC). Автори встановили оптимальну продуктивність за MFCC у середовищах з низьким співвідношенням сигнал/шум, застосовуючи модифіковану модель ResNet10_CBAM. Водночас підхід залишається орієнтованим виключно на нейромережеві методи без інтеграції класичного спектрального аналізу.

Комплексний підхід до детекції дронів запропоновано в дослідженні [8], де автори поєднують радіочастотні та акустичні ознаки для підвищення точності класифікації. Система використовує рекурентні нейронні мережі з LSTM-шарами для обробки часово-частотних характеристик, зокрема MFCC та вейвлет-перетворення. Такий підхід демонструє переваги мультимодального аналізу, забезпечуючи стійкість до шумових завад та покращену продуктивність в умовах низького співвідношення сигнал/шум.

Системи детекції дронів на основі акустичних радарів досліджуються в роботі [4], де розглянуто можливості пасивного виявлення цілей без необхідності прямої видимості. Акустичні сенсори виявляються придатними для детекції як керованих вручну, так і автономних дронів, заповнюючи функціональні прогалини в системах захисту повітряного простору.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз літературних джерел виявляє обмеженість досліджень акустичного розпізнавання в специфічних умовах, коли система детекції розміщується на рухомій платформі, що сама є джерелом акустичних завад. Переважна більшість існуючих методів розроблена для стаціонарних систем детекції або для сценаріїв, де фонові шуми мають відмінну від цільового сигналу природу походження. Водночас недостатньо вивченими залишаються випадки, коли необхідно розрізняти акустичні сигнали від об'єктів аналогічного типу в умовах, коли один з них створює домінуючий акустичний фон для детекції іншого.

Додатково встановлено брак досліджень, що зосереджуються на виділенні вузьких частотних діапазонів для розв'язання задач акустичної класифікації з подальшим застосуванням компактних векторів ознак. Існуючі роботи переважно використовують широкосмугову обробку сигналу з формуванням спектрограм великої розмірності.

Метою дослідження є розробка та дослідження методу розпізнавання акустичних сигналів, що поєднує спектральний аналіз обмеженого частотного діапазону з нейромережевою класифікацією для детекції цільових об'єктів в умовах низького співвідношення сигнал/шум. Досягнення цієї мети передбачає вирішення таких завдань: обґрунтування вибору оптимального частотного діапазону на основі аналізу гармонічної структури досліджуваних сигналів, розробка методу вилучення компактного набору спектральних ознак з обраного діапазону, синтез архітектури нейронної мережі для класифікації векторів ознак та експериментальна валідація запропонованого підходу.

Виклад основного матеріалу. Запропонований метод реалізує послідовний алгоритм обробки акустичних сигналів, що складається з чотирьох основних етапів (рис. 1).

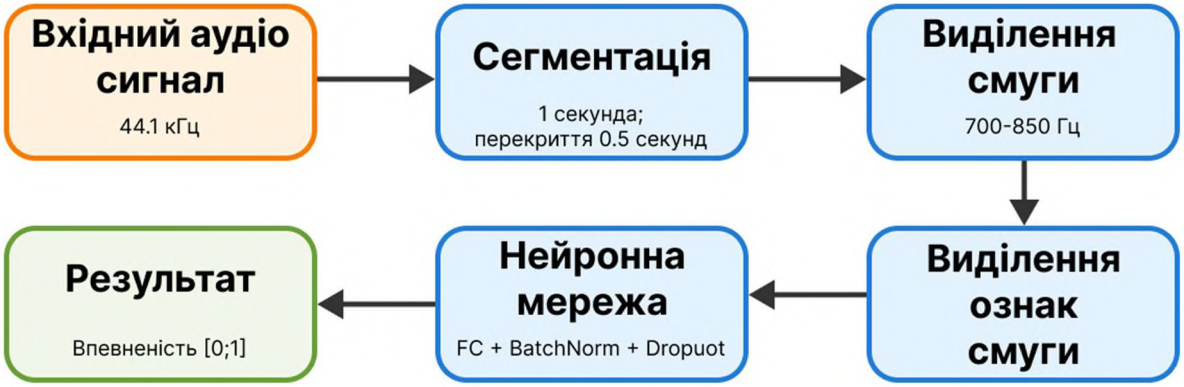


Рис. 1. Схема алгоритму обробки акустичних сигналів
Джерело: розроблено авторами.

На першому етапі здійснюється сегментація вхідного аудіосигналу на фрагменти тривалістю 1 секунда з перекриттям 0,5 секунди відповідно до методики, описаної в [6]. Такі параметри часового вікна забезпечують компроміс між темпоральною роздільністю системи та достатньою статистикою для надійного спектрального аналізу.

Другий етап передбачає фільтрацію сигналу в спеціально визначеному частотному діапазоні. Відфільтрований сигнал містить виключно ту частину спектра, де співвідношення енергії цільового та фонового компонентів є найбільш сприятливим для розрізнення.

На третьому етапі з відфільтрованого сигналу вилучається 21 числова ознака. Ці ознаки формують вектор, що містить інформацію про ключові характеристики сигналу в обраному частотному діапазоні.

Четвертий етап передбачає класифікацію отриманого вектора ознак за допомогою повнозв'язної нейронної мережі, яка видає значення впевненості в діапазоні від нуля до одиниці щодо належності аналізованого фрагмента до класу цільових сигналів. Фінальне бінарне рішення про наявність або відсутність цільового об'єкта приймається шляхом порівняння отриманого значення з попередньо встановленим порогом.

Вибір частотного діапазону для аналізу здійснювався на основі детального спектрального дослідження акустичних характеристик як цільових сигналів, так і фонових завад. Метою було знайти смуга, де цільовий звук є переважаючим над фоновими завадами. Для початкового аналізу було обрано смугу 550-650 Гц, де зосереджена основна енергія обох типів сигналів. Для побудови спектральних характеристик було використано метод

Велча, який забезпечує надійну оцінку спектральної густини потужності шляхом усереднення періодограм сегментів сигналу. Спектральна густина потужності розраховувалася за формулою (1), яка більш детально описана в роботі [9]:

$$\hat{S}xx(f)=\frac{1}{F_S UK}\sum_{i=0}^{K-1}|X_i(f)|^2, \quad (1)$$

де $\hat{S}xx(f)$ – оцінка спектральної густини потужності сигналу;

F_S – частота дискретизації (Гц);

U – нормувальний коефіцієнт, що враховує потужність вікна;

K – кількість сегментів;

$X_i(f)$ – спектр *i*-го сегмента після віконної обробки.

Результат побудови спектральних характеристик та розрахунків наведено на рисунку 2.

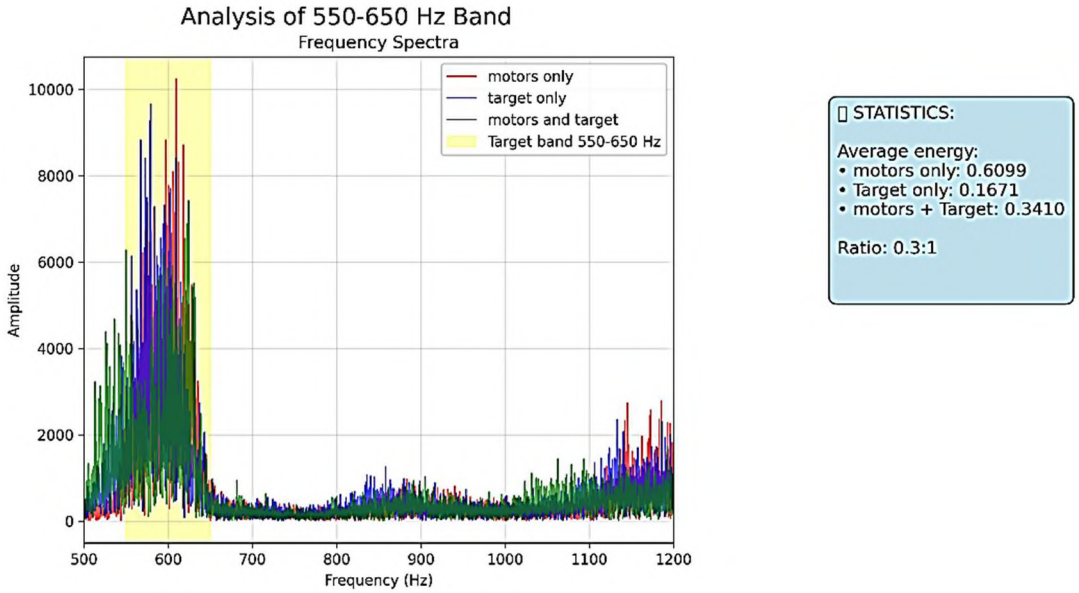


Рис. 2. Спектральний аналіз цільового сигналу та фонових завад у частотному діапазоні 550-1200 Гц

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з рис. 2, у діапазоні 550-650 Гц спостерігається значне перевищення рівня фонових завад над цільовим сигналом. Статистичний аналіз показав, що середня енергія фонового шуму (motors only) становить 0,1760, тоді як енергія цільового сигналу (target only) дорівнює лише 0,1671. Комбінований сигнал (motors and target) має енергію 0,3410, що дає співвідношення сигнал/завада приблизно 0,3:1. Такий низький рівень співвідношення значно ускладнює детекцію цільового об’єкта через домінування завадового компонента в аналізованій частотній смузі.

Отримані результати підтвердили необхідність пошуку альтернативних частотних діапазонів із більш сприятливим енергетичним балансом між цільовим сигналом та фоновими завадами.

Цільовий об’єкт дослідження в ідеальних умовах має основну частоту звуку близько 100 Гц. Враховуючи нестабільність джерела звуку та варіації режимів роботи, було прийнято рішення розширити аналізований діапазон до 150 Гц для забезпечення покриття можливих флуктуацій основної частоти та її гармонік.

Для систематичного пошуку діапазону з оптимальним співвідношенням сигнал/завада було розроблено алгоритм, який здійснює сканування частотної області від 600 Гц до 1300 Гц з кроком 50 Гц, аналізуючи смуги шириною 150 Гц. Вибір початкової частоти

600 Гц зумовлено тим, що в цій області зосереджена основна енергія як шумових завад, так і гармонік цільового сигналу. Верхня межа 1300 Гц відповідає зоні, де енергія обох типів сигналів поступово спадає.

Алгоритм використовує той самий підхід розрахунку спектральної густини потужності за методом Велча, описаний вище у формулі (1). Для кожної смуги обчислювалося співвідношення енергії цільового сигналу до енергії фонових завад згідно з формулою (2):

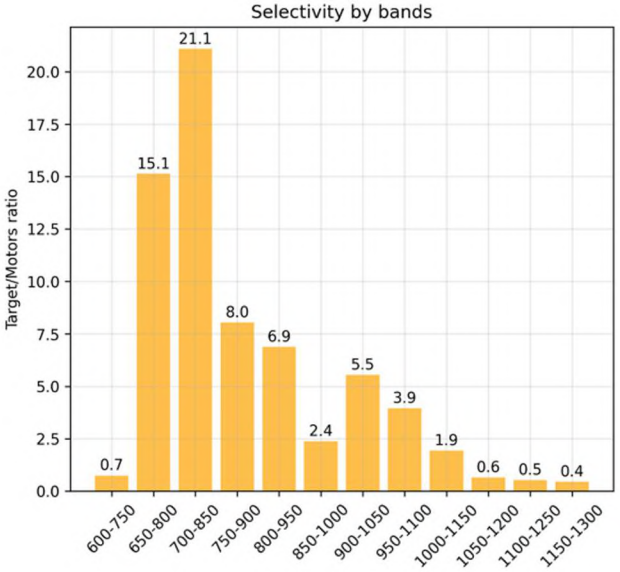
$$R = \frac{E_{target}}{E_{noise}}, \quad (2)$$

де R – співвідношення сигнал/завада;

E_{target} – енергія цільового сигналу в аналізованій смузі;

E_{noise} – енергія фонових завад в тій самій смузі.

Результат систематичного аналізу наведено на рис. 3.



BAND RANKING:

Rank	Band	Ratio
1	700-850	21.1
2	650-800	15.1
3	750-900	8.0
4	800-950	6.9
5	900-1050	5.5

Рис. 3. Результати систематичного пошуку оптимального частотного діапазону
Джерело: розроблено авторами.

Як видно з рис. 3, аналіз виявив оптимальну смугу 700-850 Гц з найвищим співвідношенням сигнал/завада 21,1:1. Друга за ефективністю смуга 650-800 Гц показала співвідношення 15,1:1. Значне перевищення цих показників порівняно з початково аналізованою смугою 550-650 Гц (співвідношення 0,3:1) підтверджує доцільність використання діапазону 700-850 Гц для подальшого аналізу та вилучення ознак.

Для підтвердження логічності виявленого оптимального діапазону було проведено детальний аналіз спектральних характеристик окремих компонентів акустичного середовища. Аналіз здійснювався на основі чотирьох фрагментів тривалістю 1 секунда для кожного з наступних варіантів звукового наповнення: виключно фонові завади (звук бортової системи носія мікрофонів), виключно цільовий сигнал, а також штучно створене поєднання цих двох об’єктів шляхом відтворення звуку цілі під час роботи бортової системи носія.

Результати аналізу спектральних характеристик цільового сигналу наведено на рис. 4.

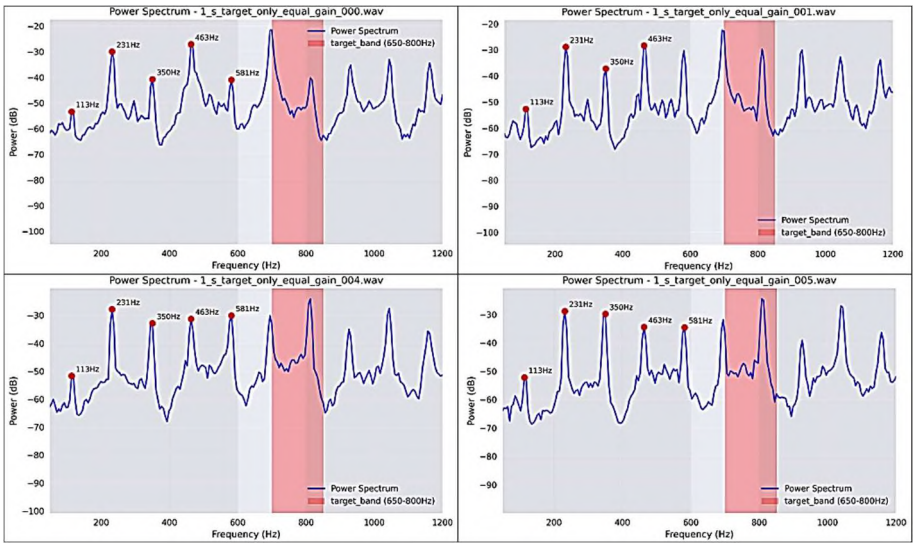


Рис. 4. Спектральні характеристики цільового сигналу з виділенням діапазону 700-850 Гц
Джерело: розроблено авторами.

Як видно з отриманих спектрограм, виділена смуга 700-850 Гц захоплює спектральні компоненти, що відповідають частині шостої та повністю сьомій гармонічній складовій цільового об’єкта. Ці гармонічні компоненти проявляються у вигляді характерних спектральних піків із відповідними частотними розширеннями, що обумовлено нестабільністю режиму роботи джерела.

Аналіз спектральних характеристик фонових завад представлено на рис. 5.

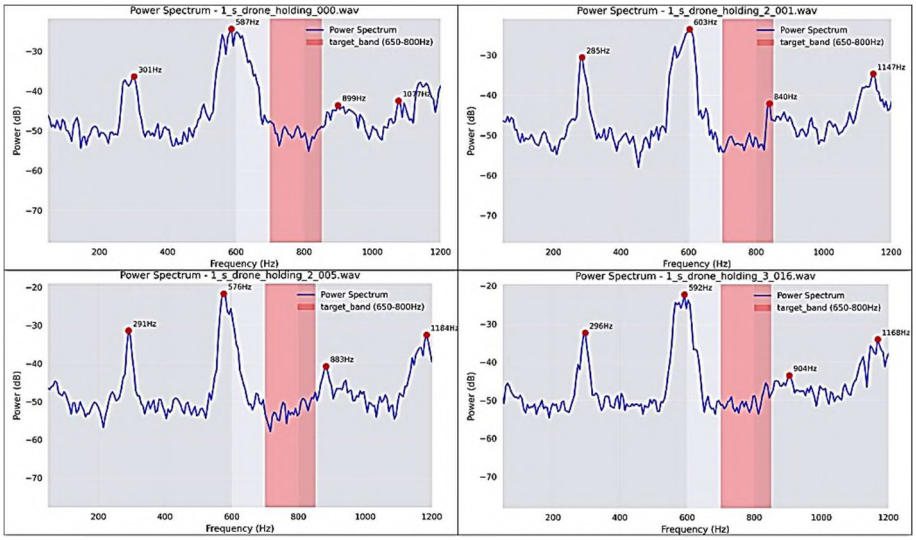


Рис. 5. Спектральні характеристики фонових завад із позначенням робочого діапазону
Джерело: розроблено авторами.

Спектральний аналіз показує, що обрана смуга 700-850 Гц потрапляє на область спектрального спаду між другою та третьою гармоніками бортової системи носія. Це створює сприятливі умови для виділення цільового сигналу, оскільки енергія завадового компонента в цьому діапазоні є мінімальною.

Результати аналізу штучно створених умов, де присутні обидва типи акустичних сигналів, наведено на рис. 6.

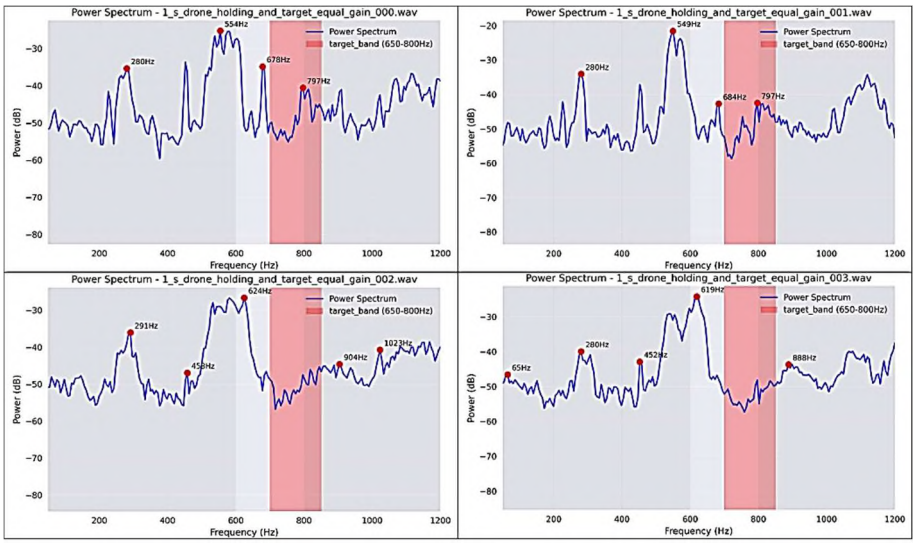


Рис. 6. Спектральні характеристики комбінованого сигналу: ціль і завади

Джерело: розроблено авторами.

У спектральній області між другою та третьою гармоніками завадового сигналу чітко проглядаються локальні піки, які є проявом цільового сигналу. Ці піки зберігають свою структуру навіть за наявності домінуючих фонових завад, що підтверджує можливість їх виділення та аналізу.

Таким чином, теоретичний аналіз підтверджує, що систематичний алгоритм пошуку оптимального частотного діапазону виявив смугу 700-850 Гц не випадково. Фізичною основою такого вибору є збіг частотного розташування високих гармонік цільового об’єкта з областю мінімальної енергії фонових завад від бортової системи носія, що створює оптимальні умови для розрізнення.

Після визначення оптимального частотного діапазону 700-850 Гц наступним етапом методу є вилучення інформативних ознак із відфільтрованого сигналу. Сформований набір ознак включає три групи параметрів:

1. Основні спектральні ознаки:

– RMS енергія сигналу – середньоквадратичне значення амплітуди;

– пікова амплітуда – максимальне абсолютне значення амплітуди в аналізованому фрагменті;

– частота перетинів нуля – кількість переходів сигналу через нульовий рівень, нормована на довжину фрагмента;

– амплітуда спектрального піку – максимальне значення модуля Фур’є-перетворення в аналізованому діапазоні;

– позиція піку – частота максимуму, нормована відносно центру діапазону (775 Гц);

– ширина піку – частотний діапазон на рівні половини максимальної амплітуди, нормований на ширину смуги;

– статистичні моменти спектру: середнє значення, дисперсія чи стандартне відхилення, асиметрія та ексцес.

2. MFCC, які забезпечують представлення спектральної оболонки сигналу з урахуванням особливостей людського слухового сприйняття. Для діапазону 700-850 Гц обчислюється вісім параметрів налаштуванням мел-фільтрів на вузький частотний діапазон. Для кожного фрагмента використовується усереднене за часом значення кожного коефіцієнта.

3. Додаткові характеристики:

– гармонічна чистота – відношення амплітуди спектрального піку до сумарної енергії спектру в смузі;

– спектральна різкість – середня крутизна градієнтів навколо спектрального піку;

– часова когерентність – автокореляція огинаючої сигналу між сусідніми часовими вікнами.

Розрахунок основних спектральних ознак здійснювався за методиками, описаними в [10]. MFCC коефіцієнти з першого по восьмий обчислювалися згідно з підходом, представленим в [11]. Додаткові характеристики розраховувалися на основі методів, викладених у [12] для гармонічної чистоти та спектральної різкості, а також методів, наведених у [13], для часової когерентності.

Сформований вектор ознак забезпечує комплексну характеристику акустичного сигналу в обраному частотному діапазоні. Він використовується як вхідний тензор для нейронної мережі класифікації.

Враховуючи компактність вхідних даних та необхідність функціонування на автономних системах з обмеженими обчислювальними ресурсами, було розроблено повнозв'язну нейронну мережу (Fully Connected Neural Networks – FCNN) на основі лінійних шарів. Архітектура мережі представлена на рисунку 7.

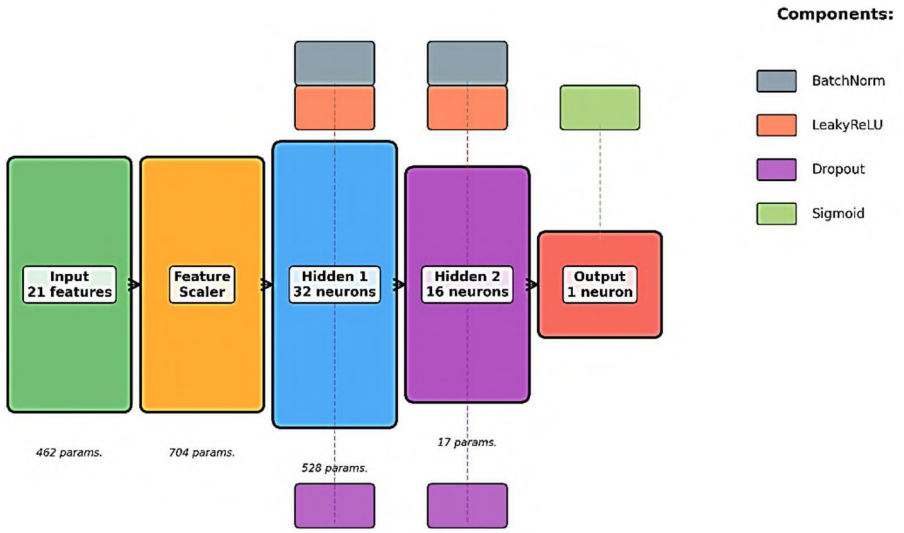


Рис. 7. Архітектура повнозв'язної нейронної мережі для класифікації векторів ознак
Джерело: розроблено авторами.

Запропонована нейромережна модель складається з послідовності лінійних шарів із регуляризацією та нормалізацією:

– Вхідний шар: приймає 21-вимірний вектор ознак.

– Попередня нормалізація: Feature Scaler для стандартизації вхідних даних.

– Перший прихований шар: лінійний шар з 32 нейронами, функція активації LeakyReLU, BatchNorm та Dropout.

– Другий прихований шар: лінійний шар з 16 нейронами з аналогічною конфігурацією.

– Вихідний шар: лінійний шар з 1 нейроном та сигмоїдною функцією активації для бінарної класифікації.

Загальна кількість параметрів моделі становить 1710. Реалізація виконана з використанням бібліотеки PyTorch 2.0 у середовищі Python 3.10. Для ініціалізації ваг застосовувалася методика Kaiming для LeakyReLU активації.

Методологія експериментального дослідження. Експериментальне дослідження проводилося з використанням акустичних записів, отриманих в умовах реального функціонування системи детекції на рухомій платформі. Цільові акустичні сигнали характе-

ризувалися основною частотою близько 100 Гц, що відповідає роботі чотирициліндрового двотактного двигуна досліджуваного об’єкта, з можливими варіаціями залежно від режиму роботи. Фонові завади створювалися квадрокоптером-носієм системи детекції, що генерував інтенсивні акустичні сигнали в широкому частотному діапазоні з домінуючими компонентами в низькочастотній області.

Всі акустичні дані записувалися з частотою дискретизації 44,1 кГц, що забезпечувало аналіз сигналів у діапазоні до 22 кГц.

Навчання нейронної мережі проводилося протягом 300 епох з механізмом раннього зупинення (early stopping), який спрацював на 204 епосі для запобігання перенавчанню. Розподіл датасету здійснювався у співвідношенні 60 % для навчання, 20 % для валідації та 20 % для тестування. Навчальна вибірка містила 650 позитивних фрагментів (наявність цільового сигналу) та 850 негативних фрагментів (відсутність цільового сигналу).

Параметри навчання для обраної архітектури нейронної мережі включали: швидкість навчання (learning rate) встановлена на рівні 0,001 для забезпечення стабільної конвергенції, розмір пакета (batch size) – 32 елементи, що є допустимим через невеликий розмір вхідного тензора.

Оцінювання продуктивності моделі здійснювалося за стандартними метриками для задач бінарної класифікації [14]:

- Accuracy – загальна точність класифікації
- Precision – точність позитивного класу
- Recall – повнота (чутливість)
- F1-Score – гармонійне середнє Precision та Recall.

Основною метрикою для оцінювання якості моделі була обрана Accuracy на тестовому наборі як найбільш репрезентативна для збалансованого датасету.

Фінальні результати на тестовій вибірці:

- Accuracy: 90,85 %;
- Precision: 86,26 %;
- Recall: 93,39 %;
- F1-Score: 89,68 %.

Процес навчання та динаміка зміни метрик представлені на рис. 8.

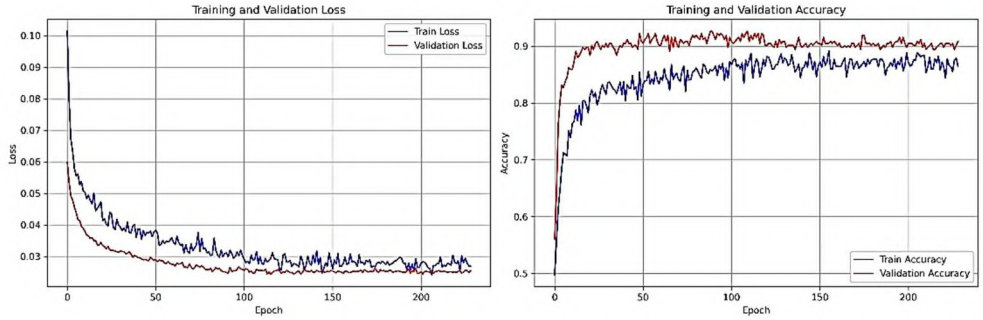


Рис. 8. Динаміка зміни метрик точності під час навчання моделі

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати демонструють здатність запропонованого методу до детекції цільових сигналів навіть в умовах низького співвідношення сигнал/завада.

Аналіз результатів дослідження. Оцінка ефективності запропонованого методу для задачі бінарної класифікації в умовах низького співвідношення сигнал/завада проводилась на тестовому наборі, що містив 650 позитивних та 850 негативних зразків.

Показник Accuracy (точність), що відображає загальну частку правильно класифікованих фрагментів серед усіх тестових зразків, склав 90,85 %. Цей результат вказує на здатність розробленої моделі нейронної мережі до ефективної класифікації обох класів.

Precision (влучність), що характеризує частку дійсно позитивних зразків серед тих, що були класифіковані як позитивні, виявився на рівні 86,26 %.

Recall (повнота), що показує частку правильно виявлених позитивних зразків від їх загальної кількості в тестовій вибірці, дорівнює 93,39 %. Високе значення цієї метрики свідчить про низький рівень пропусків цільових сигналів – менше 7 % дійсно позитивних зразків залишилися невиявленими.

F1-Score, що являє собою гармонічне середнє між Precision та Recall, забезпечуючи збалансовану оцінку ефективності моделі для позитивного класу, становить 89,68 %. Близькість цього значення до показників Precision та Recall підтверджує стабільність роботи класифікатора.

Висновки. У ході дослідження розроблено метод розпізнавання акустичних сигналів для детекції цільових об'єктів в умовах, коли їх енергія нижча за енергію фонових завад від власної платформи детекції. Метод ґрунтується на послідовному виконанні чотирьох етапів: сегментація аудіосигналу на фрагменти тривалістю 1 секунда з перекриттям 0,5 секунди, фільтрація сигналу в оптимальному частотному діапазоні, вилучення 21 ознаки сигналу та нейромережева класифікація.

Визначення оптимального частотного діапазону здійснювалось шляхом систематичного сканування смуг шириною 150 Гц у діапазоні 600-1300 Гц з кроком 50 Гц. Для досліджуваного випадку обраний діапазон 700-850 Гц забезпечив співвідношення сигнал/завада 21,1:1 завдяки збігу з шостою та сьомою гармоніками цільового об'єкта – звуку чотирициліндрового двотактного двигуна – та розташуванню між другою і третьою гармоніками завадового сигналу квадрокоптера-носія. Запропонований алгоритм пошуку оптимального частотного діапазону є універсальним і може бути адаптований для інших комбінацій цільових об'єктів та джерел завад.

Експериментальна валідація на датасеті з 1500 зразків показала точність 90,85 %, що підтверджує працездатність методу в умовах низького співвідношення сигнал/завада. Високе значення Recall (93,39 %) свідчить про мінімізацію пропусків цільових об'єктів.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання статті автори не використовували генеративний ШІ. Використовувалися технології ШІ Gemini для допомоги в пошуку існуючих рішень проблеми. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Famili, A., Stavrou, A., Wang, H., Park, J.-M., & Gerdes, R. (2024). Securing Your Airspace: Detection of Drones Trespassing Protected Areas. *Sensors, 24(2),* 14. https://doi.org/10.3390/s24020579.

2. Wilshin, S. (2023). Seeing with sound; surface detection and avoidance by sensing self-generated noise. *International Journal of Micro Air Vehicles, 15(1),* 1-12. https://doi.org/10.1177/17568293221148377.

3. Vashishtha, G., & Kumar, R. (2023). Editorial: Advances in noise reduction and feature extraction of acoustic signal. *Frontiers in Physics, 11*, 1287956. https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1287956.

4. Zakaria, N. A. Z., Mohd Rozaimi, F. N. S., Enche Ab Rahim, S. A., & Khan, Z. I. (2024). Signal analysis for drone detection and characterization using acoustic radar. *Journal of Physics Conference Series, 2922(1)*, 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2922/1/012003.

5. Yurdakul, M., & Tasdemir, S. (2023). *Acoustic signal analysis with deep neural network for detecting fault diagnosis in industrial machines*. *International Journal of Applied Engineering Research, 12*(12), 3461-3469. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.01062.

6. Liu, Z., Fan, K., Chen, Y., Xiong, L., Ye, J., Fan, A., & Zhang, H. (2025). Deep learning-based acoustic recognition of UAVs in complex environments. *Drones, 9*(6), 389. https://doi.org/10.3390/drones9060389.

7. Казимир, В., Роговенко, А., & Карась, О. (2024). Використання штучних нейронних мереж для аудіо класифікації на мінікомп'ютерній платформі. *Технічні науки та технології,* (4(38)), 134-149. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-134-149.

8. Frid, A., Ben-Shimol, Y., Manor, E., & Greenberg, S. (2024). Drones detection using a fusion of RF and acoustic features and deep neural networks. *Sensors*, *24* (8), 2427. https://doi.org/10.3390/s24082427.

9. Same, M. H., Gandubert, G., Gleeton, G., Ivanov, P., & Landry, R. (2020). Simplified welch algorithm for spectrum monitoring. *Applied Sciences*, *11*(1), 86. https://doi.org/10.3390/app11010086.

10. Madanian, S., Chen, T., Adeleye, O., Templeton, J. M., Poellabauer, C., Parry, D., Schneider, S. L. (2023). Speech emotion recognition using machine learning – A systematic review. *Intelligent Systems with Applications, 20*, 200266. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305323000911.

11. Mukkamala, S. N. V. J., & Radhika, Y. (2020). A review: Music feature extraction from an audio signal. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9*(2), 974-976.

12. Prabhakar, S. K., Rajaguru, H., & Won, D.-O. (2024). Coherent feature extraction with swarm intelligence based hybrid adaboost weighted ELM classification for snoring sound classification. *Diagnostics*, *14*(17), 1857. https://doi.org/10.3390/diagnostics14171857.

13. Lee, J., & Oxenham, A. J. (2025). Temporal coherence effects on voice attribution in multi-speaker stream segregation. *JASA Express Letters*, *5*(5). https://doi.org/10.1121/10.0036672.

14. Rainio, O., Teuho, J., & Klén, R. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x.

References

1. Famili, A., Stavrou, A., Wang, H., Park, J.-M., & Gerdes, R. (2024). Securing Your Airspace: Detection of Drones Trespassing Protected Areas. Sensors, 24(2), 14. https://doi.org/10.3390/s24020579.

2. Wilshin, S. (2023). Seeing with sound; surface detection and avoidance by sensing self-generated noise. International Journal of Micro Air Vehicles, 15(1), 1-12. https://doi.org/10.1177/17568293221148377.

3. Vashishtha, G., & Kumar, R. (2023). Editorial: Advances in noise reduction and feature extraction of acoustic signal. Frontiers in Physics, 11, 1287956. https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1287956.

4. Zakaria, N. A. Z., Mohd Rozaimi, F. N. S., Enche Ab Rahim, S. A., & Khan, Z. I. (2024). Signal analysis for drone detection and characterization using acoustic radar. Journal of Physics Conference Series, 2922(1), 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2922/1/012003.

5. Yurdakul, M., Tasdemir, S. (2023). Acoustic Signal Analysis with Deep Neural Network for Detecting Fault Diagnosis in Industrial Machines. International Journal of Applied Engineering Research, 12(12), 3461-3469. https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.01062.

6. Liu, Z., Fan, K., Chen, Y., Xiong, L., Ye, J., Fan, A., Zhang, H. (2025). Deep Learning-Based Acoustic Recognition of UAVs in Complex Environments. *Drones, 9*(6), 389. https://doi.org/10.3390/drones9060389.

7. Kazymyr, V., Rohovenko, A., & Karas, O. (2024). Vykorystannia shtuchnykh neironnykh merezh dlia audio klasyfikatsii na minikompiuternii platformi. [The use of artificial neural networks for audio classification on a minicomputer platform.], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical Sciences and Technologies,* (4(38)), 134-149. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-134-149.

8. Frid, A., Ben-Shimol, Y., Manor, E., Greenberg, S. (2024). Drones Detection Using a Fusion of RF and Acoustic Features and Deep Neural Networks. Sensors, 24(8), 2427. https://doi.org/10.3390/s24082427.

9. Same, M. H., Gandubert, G., Gleeton, G., Ivanov, P., Landry Jr., R. (2021). Simplified Welch Algorithm for Spectrum Monitoring. Applied Sciences, 11(1), 86. https://doi.org/10.3390/app11010086.

10. Madanian, S., Chen, T., Adeleye, O., Templeton, J. M., Poellabauer, C., Parry, D., Schneider, S. L. (2023). Speech emotion recognition using machine learning – A systematic review. Intelligent Systems with Applications, 20, 200266. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667305323000911.

11. Mukkamala, S. N. V. Jitendra, & Radhika, Y. (2020). A Review: Music Feature Extraction from an Audio Signal. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9(2), 974-976.

12. Prabhakar, S. K., Rajaguru, H., & Won, D. O. (2024). Coherent Feature Extraction with Swarm Intelligence Based Hybrid Adaboost Weighted ELM Classification for Snoring Sound Classification. Diagnostics, 14(17), 1857. https://doi.org/10.3390/diagnostics14171857.

13. Lee, J., & Oxenham, A. J. (2025). Temporal coherence effects on voice attribution in multi-speaker stream segregation. JASA Express Letters, 5(5), 054401. https://doi.org/10.1121/10.0036672.

14. Rainio, O., Teuho, J., & Klén, R. (2024). Evaluation metrics and statistical tests for machine learning. Scientific Reports, 14, 6086. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x.

Отримано 17.09.2025

UDC 004.2

Volodymyr Kazymyr[1], Andrii Rohovenko[2], Konstiantin Tkachenko[3]

[1]Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: arogovenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4594-5692. **ResearcherID:** G-3926-2014

[3]Student of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: kostiantintkachenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-0927-0080

METHOD OF ACOUSTIC SIGNAL RECOGNITION BASED ON SPECTRAL ANALYSIS USING NEURAL NETWORKS

The paper proposes a method for recognizing acoustic signals based on spectral analysis and neural networks for detecting target objects under negative signal-to-noise ratio conditions. A specific task of acoustic identification is investigated, where the target signal has a lower power level compared to background noise from a source of similar nature. Based on a preliminary analysis of the harmonic structure of the studied signals, the frequency range of 700-850 Hz was determined as optimal for distinguishing target and background components.

A custom analyzer was developed to extract 21 spectral features from the selected frequency range using time windows of 1 second with a 0.5-second overlap. An architecture of a fully connected neural network with two hidden layers was proposed for classifying the feature vectors. Experimental validation of the method demonstrated a detection accuracy of 88 % with a false alarm rate of 4 %.

The method provides a compact representation of acoustic information and computational efficiency by focusing on a predefined informative frequency range instead of processing the full signal spectrum.

Keywords: *acoustic recognition; spectral analysis; neural networks; low SNR; frequency selection; feature vectors.*
Fig.: 8. Ref.: 14.

Казимир В. В., Роговенко А. І., Ткаченко К. О. Метод розпізнавання акустичних сигналів за даними спектрального аналізу за допомогою нейронних мереж. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 146-157. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-146-157.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-158-168
УДК 004.056:004.8

Алла Григорівна Гребенник[1], Олексій Ігорович Трунов[2]

[1]старший викладач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: grebennik.alla@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000–0002–7464–1412
Scopus Author ID: 57219054928

[2]аспірант, викладач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: alexeytrunov1995@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-0321-2669
Scopus Author ID: 59337119500

АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ АГРЕГОВАНОЇ ДИНАМІЧНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ БЕЗПЕКИ МЕРЕЖЕВОГО КОНТЕНТУ

Зростання складності кіберзагроз та обсягів мережевого контенту висуває проблему недостатності існуючих підходів до оцінки стану інформаційної безпеки. Актуальним завданням є агрегація різнорідних, неповних та неточних даних, що надходять від численних систем захисту (SIEM, IDS/IPS, антивіруси, ШІ-системи) у єдиний інтегральний показник, що дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення в умовах невизначеності.

У результаті дослідження запропоновано алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту. Алгоритм інтегрує два компоненти: нечітку базову оцінку, що враховує статичні архітектурні характеристики системи на основі апарату нечіткої логіки, та динамічну оцінку, що кількісно відображає рівень поточної загрози на основі даних від інтелектуальних систем аналізу. Запропонований підхід дозволяє отримати єдиний інтегральний показник стану безпеки в режимі, наближеному до реального часу, та використовувати його як тригер для реалізації механізмів адаптивного управління та автоматизованого реагування на інциденти.

Ключові слова: *інформаційна безпека; мережевий контент; агрегована оцінка; динамічна оцінка; штучний інтелект; нечітка логіка; адаптивне управління.*

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Метою застосування засобів захисту корпоративної мережі є ефективна та оперативна протидія всім потенційно можливим інформаційним загрозам. У цьому контексті аналіз мережевого контенту відіграє критично важливу роль, оскільки він є одночасно як вектором для поширення атак, так і ключовим джерелом інформації для систем моніторингу та реагування. Однак сучасні корпоративні мережі функціонують в умовах невпинного зростання обсягів даних та перманентної еволюції загроз. Це змушує приймати рішення щодо класифікації контенту та вибору механізмів реагування в умовах значної невизначеності, яка породжується неповнотою, неточністю та різнорідністю даних.

Зазначені обставини об’єктивно вимагають розробки нового науково-методичного апарату, основу якого повинні складати інтелектуальні алгоритми, здатні виконувати комплексну оцінку захищеності та прогнозування загроз на основі безперервного аналізу контенту.

Постановка проблеми. Сучасні корпоративні мережі функціонують в умовах експоненційного зростання обсягів мережевого контенту та перманентної еволюції загроз. Це обумовлює критичну необхідність у розробці проактивних механізмів захисту. Актуальність дослідження зумовлена низкою нерозв’язаних науково-практичних проблем, центральною з яких є відсутність єдиної методології для комплексної оцінки стану безпеки мережевого контенту в умовах невизначеності.

Ключові проблеми, що потребують вирішення, полягають у наступному:

1. Проблема агрегації різнорідних даних. Засоби захисту (SIEM, IDS/IPS, антивіруси, ШІ-системи) генерують величезну кількість різнорідних за своєю природою показників: від статичних характеристик конфігурації системи до динамічних вердиктів про виявлені аномалії. Відсутній формалізований підхід, який би дозволяв агрегувати ці неповні, неточні та різнорідні дані в єдиний, інтегрований показник безпеки.

© А. Г. Гребенник, О. І. Трунов, 2025

2. Проблема динамічної оцінки. Адаптивний характер сучасних кібератак, які використовують багатовекторні стратегії та приховані канали передачі даних, робить статичні або періодичні оцінки неефективними. Є гостра потреба в механізмі динамічної оцінки, здатному оновлювати стан безпеки в режимі, наближеному до реального часу, реагуючи на постійний потік змін мережевого контенту.

3. Проблема формалізації критеріїв. Складність формалізації критеріїв оцінки рівня безпеки, які мають комплексно враховувати як статичні (архітектурні) аспекти, так і динамічні (подієві) характеристики, вимагає застосування інтелектуальних підходів, здатних працювати з нечіткими та неповними вхідними даними.

Зазначені обставини об'єктивно вимагають розробки нового науково-методичного апарату. Таким чином, актуальною науковою задачею є розробка алгоритму визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту, який би забезпечував синтез даних із різнорідних джерел та надавав обґрунтовану основу для ухвалення рішень щодо механізмів реагування, гарантуючи адекватну протидію як відомим, так і раніше невизначеним кіберзагрозам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основоположні принципи захисту та моніторингу [1] створюють загальну рамку для побудови систем безпеки. Існуючі методики агрегації метрик [2; 3] та апарат нечіткої логіки для обробки невизначених даних [4] надають теоретичну основу для інтеграції показників. З розвитком загроз ключовою стала концепція адаптивної безпеки [5], рушійною силою якої є методи машинного навчання (МН) [6], що дозволяють виявляти аномалії безпосередньо в трафіку на основі якісних наборів даних [7]. Найсучасніші дослідження пропонують високоточні системи на основі штучного інтелекту (ШІ) для виявлення складних цільових атак (APT) [8] та превентивного виявлення загроз за допомогою генеративно-змагальних мереж (GAN) [9].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес, залишається невирішеною проблема цілісної оцінки стану безпеки мережевого контенту. Сучасні засоби захисту генерують величезну кількість різнорідних показників (статичні конфігурації, динамічні вердикти ШІ-систем), однак відсутній формалізований підхід для їх агрегації у єдиний, інтерпретований індикатор. Крім того, адаптивний характер кібератак вимагає механізму динамічної оцінки, здатному оновлювати стан безпеки в режимі реального часу.

Метою статті є розробка алгоритму визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту. Цей алгоритм має виступати як інтеграційна платформа (*fusion engine*), що вирішує зазначені проблеми, об'єднуючи різнорідні показники безпеки в єдиний індикатор для запуску механізмів адаптивного реагування.

Виклад основного матеріалу. У межах дослідження запропонована модифікація алгоритму аналізу захищеності мережевого контенту на базі вже існуючих підходів [10] із залученням апарату нечіткої логіки та штучного інтелекту [11; 12]. Застосування методів технології «м'яких обчислень» для модифікації дозволяє алгоритмам набути властивостей, що є перспективними щодо захисту інформації: адаптивність, навчання, розпізнавання тощо [13]. Їх застосування закономірно щодо вимог до інформаційно-комунікаційних систем, які протягом життєвого циклу постійно змінюють свої стани, а рівень їх захищеності повинен бути максимально стабільним і таким, що відповідає заданим вимогам. Тільки такі системи мають високу ймовірність протистояти новим, раніше невідомим загрозам.

Для проведення аудиту мережевого контенту щодо забезпечення інформаційної безпеки розглянемо критерії і метрики рівня захищеності. Серед них:

1. Функціональні критерії оцінки рівня захищеності, що оцінюють конкретні функції безпеки, які надаються системою, безпосередньо або опосередковано через мережевий контент.

2. Критерії гарантії безпеки, що оцінюють рівень довіри до того, що функції безпеки реалізовані коректно та ефективно, які можуть включати перевірку через мережевий контент.

3. Додаткові метрики аудиту, пов'язані з контент-аналізом, що характеризують взаємодію користувачів з контентом, які є основою для його подальшого аналізу в контексті ІБ, або є результатами такого аналізу.

Важливо зазначити, що критерії і метрики можуть мати як якісні, так і кількісні аспекти залежно від того, як вони вимірюються та інтерпретуються в конкретному аудиті (табл. 1).

Таблиця 1 – Критерії для аналізу мережевого контенту щодо забезпечення інформаційної безпеки

Категорія критерію	Фактор / Сімейство вимог ISO/IEC 15408 [14]	Тип (якісний / кількісний / змішаний)	Опис / Призначення (аналіз мережевого контенту в контексті ІБ)
1. Функціональні критерії оцінки рівня захищеності			
1	2	3	4
Аудит безпеки	FAU: security audit	Змішаний	Якість журналювання подій безпеки. Важливо для аналізу мережевих подій.
Зв'язок	FCO: communication	Якісний	Безпека комунікацій (шифрування, цілісність). Аналізується через мережевий контент.
Криптографічна підтримка	FCS: cryptographic support	Змішаний	Використання криптографічних засобів. Аналіз контенту для ідентифікації шифрування.
Захист даних користувача	FDP: user data protection	Змішаний	Механізми захисту даних. Аналіз контенту на предмет витоків конфіденційної інформації.
Ідентифікація та аутентифікація	FIA: identification and authentication	Змішаний	Процеси ідентифікації/аутентифікації. Аналіз трафіку для виявлення атак.
Секретність	FPR: privacy	Якісний	Заходи щодо конфіденційності. Аналіз контенту для виявлення порушень.
Використання ресурсів	FRU: resource utilisation	Змішаний	Управління ресурсами для запобігання відмові в обслуговуванні. Аналіз контенту для виявлення DoS/DDoS.
Доступ до ЦОО (цільового об'єкта оцінки)	FTA: TOE access	Якісний	Механізми доступу до системи. Аналіз контенту для моніторингу несанкціонованих спроб доступу.
Надійний маршрут/канал	FTP: trusted path/ channels	Якісний	Наявність захищених каналів зв'язку. Аналіз контенту для верифікації їх безпеки.
2. Критерії гарантії безпеки (Assurance Requirements)			
Життєвий цикл та розробка	ADT: Development; ALC: Life-cycle Support	Якісна	Безпека процесів розробки, тестування, підтримки ПЗ/обладнання. Впливає на безпеку контенту.
Тестування	ATE: Tests	Змішаний	Адекватність тестування функцій безпеки. Частиною аналізу мережевого контенту є оцінювання результатів тестів на проникнення.
Оцінка вразливих місць	AVA: Vulnerability assessment	Змішаний	Виявлення, аналіз, оцінка вразливостей мережевого контенту.
Конфігураційне управління	ACM: Configuration Management	Якісна	Контроль за змінами та конфігурацією. Знижує ризик вразливостей через контент.

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
Доставка та експлуатація	ADO: Delivery and Operation	Якісна	Безпечні процедури доставки/встановлення. Забезпечує безпечну доставку контенту (оновлень).
Керівництво (документація)	AGD: Guidance Documents	Якісна	Якість документації з безпечної експлуатації. Включає інструкції щодо роботи з мережевим контентом.
3. Додаткові метрики аудиту, пов'язані з контент-аналізом			
Кількість інцидентів безпеки	Метрика ефективності (SIEM, SOAR)	Кількісна	Зареєстровані інциденти безпеки. Виявляються та відстежуються через аналіз мережевого контенту.
Час виявлення та реагування	Метрика продуктивності (SOAR)	Кількісна	Час від інциденту до його усунення. Ефективний аналіз контенту скорочує цей час.
Відсоток відповідності вимогам	Метрика відповідності (Compliance)	Кількісна	Дотримання політик ІБ та стандартів. Перевіряється аналізом контенту, якщо вимоги стосуються мережевої активності.
Результати тестування на проникнення та сканування вразливостей	Метрика тестування (Pentest)	Змішана	Виявлені вразливості, успішність проникнення. Базується на аналізі мережевого трафіку тестів.
Тональність згадок (Sentiment Analysis)	Дані з відкритих джерел (OSINT)	Якісна	Емоційне забарвлення згадок про систему. Моніторинг репутації та загроз.
Авторитет джерела (Source Authority)	Дані аналізу контенту	Якісна	Оцінка надійності джерела мережевого контенту. Критично для виявлення фішингу, дезінформації.
Репутація IP-адрес/доменів	Дані Threat Intelligence	Якісна	Оцінка відомої загрози IP-адрес/доменів. Інтеграція з базами репутацій.
Виявлення шкідливого коду/файлів	Метрика захисту (Antivirus, EDR, Sandbox)	Кількісний	Ідентифікація/блокування шкідливого ПЗ у мережевому контенті.
Виявлення спроб фішингу/шахрайства	Метрика захисту (Email Gateway, NLP)	Якісна	Ідентифікація ознак фішингових атак у контенті.

Джерело: розроблено авторами.

У розробці були використані лише функціональні критерії оцінки рівня захищеності та додаткові метрики аудиту, оскільки вони повною мірою описують ефективність виявлення, класифікації та реагування на потенційно шкідливий або невідповідний мережевий контент, забезпечуючи адекватну оцінку здатності системи до запобігання, моніторингу та протидії кіберзагрозам в умовах динамічного мережевого середовища.

Щодо критеріїв гарантії безпеки, то вони є методологічними та валідаційними факторами, що забезпечують достовірність і якість оцінки «факторів впливу», зокрема:

– аналіз вразливостей (AVA) інформує про довіру до оцінок статичних (функціональних) факторів та допомагає зрозуміти потенційну небезпеку динамічних подій;

– тестування гарантії (ATE) підтверджує належне функціонування статичних критеріїв;

– конфігураційне управління (ACM) підтримує визначений рівень якості статичних критеріїв;

– управління життєвим циклом та розробкою (ALC) впливає на загальну якість функціоналу.

Таким чином, критерії гарантії безпеки є не динамічними вхідними даними, а мета-критеріями, що формують якість та достовірність початкових даних та процедур оцінки, що є частиною валідації та забезпечення якості алгоритму.

Для забезпечення комплексного та адаптивного захисту інформаційних ресурсів пропонується алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту (рис. 1).

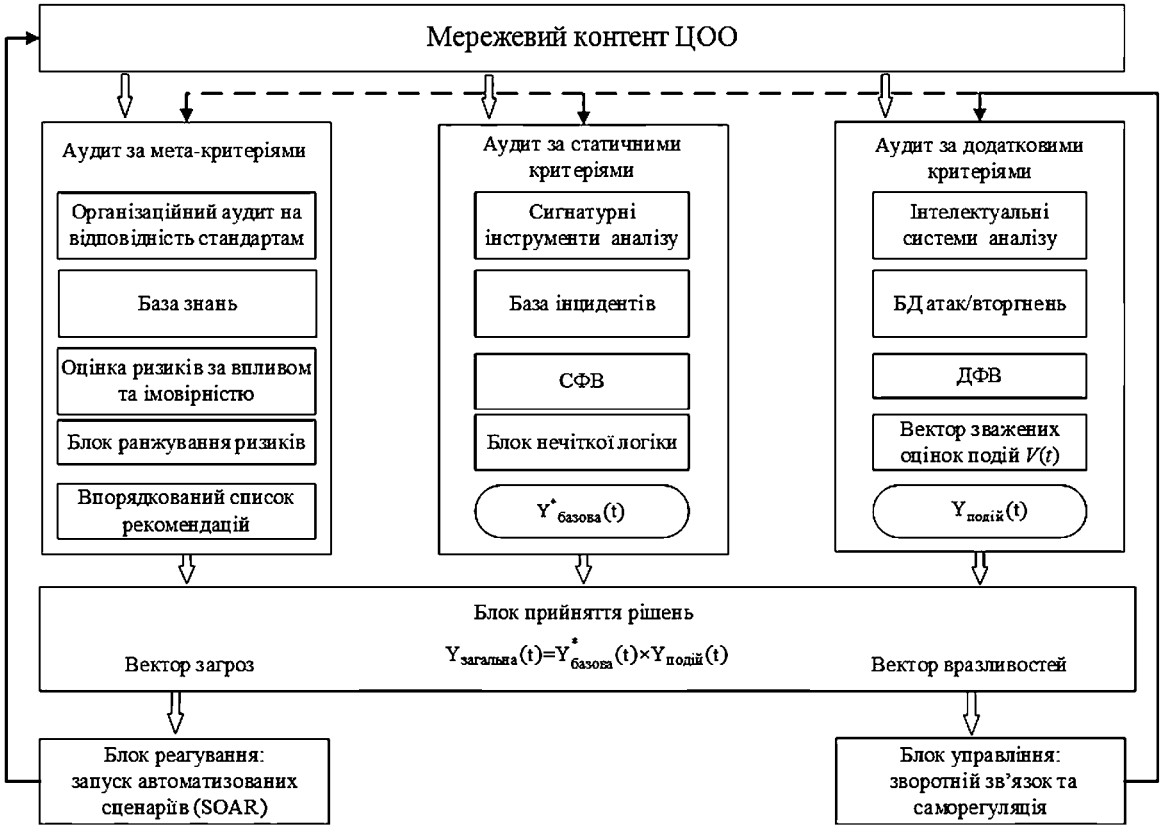


Рис. 1. Алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту

Джерело: розроблено авторами.

Цей алгоритм дозволяє в режимі, наближеному до реального часу, інтегрувати як статичні, так і динамічні фактори, що впливають на рівень інформаційної безпеки.

В основі методології лежить застосування апарату нечіткої логіки для формалізації та обробки якісних експертних оцінок статичних параметрів системи захисту, а також їх подальша комбінація з кількісними показниками подій безпеки, що моніторяться. Підсумкова інтегральна оцінка (Y) служить індикатором поточного рівня захищеності та є тригером для активації механізмів адаптивного управління безпекою [15].

Розроблений алгоритм передбачає три ключові етапи: визначення нечіткої базової оцінки; визначення оцінки впливу подій; визначення загальної інтегральної оцінки.

Етап 1. *Визначення нечіткої базової оцінки* ($\tilde{Y}_{\text{базова}}$). Базова оцінка відображає фундаментальний рівень захищеності системи, що базується на її відносно стабільних характеристиках – статичних факторах впливу (СФВ). Їх визначення відбувається на етапі початкової підготовки та конфігурації.

1.1. Вибір та формалізація СФВ. Статичні фактори впливу є фундаментальними, відносно незмінними характеристиками системи захисту, що відображають її архітектурну

надійність та відповідність стандартам. Вибір СФВ базується на функціональних критеріях безпеки міжнародного стандарту ISO/IEC 15408 (FAU, FCO, FCS, FDP, FIA, FPR, FRU, FTA, FTP), що наведені в табл. 1. Кожен обраний критерій розглядається як лінгвістична змінна $\tilde{x}_i$, для якої визначаються терм-множини (на кшталт, {незадовільний, достатній, оптимальний}) та будуються відповідні функції належності $\mu(x)$.

1.2. Модель розрахунку. Для обчислення базової оцінки використовується нечітка регресійна модель. Загальний вигляд моделі для розрахунку нечіткої базової оцінки стану безпеки є таким:

$$\tilde{Y}_{\text{базова}} = \tilde{\beta}_0 \oplus \sum_{i=1}^{n} \tilde{\beta}_i \otimes \tilde{x}_i \ \oplus \sum_{u,j=1}^{n} \tilde{\beta}_{ju} \otimes \tilde{x}_j \otimes \tilde{x}_u \ \ (j \neq u), \quad (1)$$

де $\tilde{Y}_{\text{базова}}$ – нечітка базова оцінка функціональної безпеки мережевого контенту;

n – загальна кількість статичних факторів моделі;

$\tilde{x}_i$ – лінгвістична змінна, що відповідає *і-му* статичному фактору;

$\tilde{\beta}_0, \tilde{\beta}_i, \tilde{\beta}_{ju}$ – нечіткі коефіцієнти, що визначають вагу компонентів моделі [16]. Зокрема: $\tilde{\beta}_0$ – нечіткий вільний член (базове зміщення), $\tilde{\beta}_i$ – нечітка вага, що визначає важливість *i*-го статичного фактору, $\tilde{\beta}_{ju}$ – нечітка вага, що визначає силу та характер взаємодії між *j*-м та *u*-м факторами;

$\oplus, \otimes$ – операції нечіткого додавання та нечіткого множення відповідно.

Таким чином, така модель коректно обробляє та поширює невизначеність на кожному етапі розрахунку – від вхідних лінгвістичних оцінок до параметрів самої моделі, що дозволяє отримати більш адекватний та обґрунтований кінцевий результат.

На етапі динамічної оцінки розрахунок здійснюється за допомогою моделі (1) з використанням поточних значень $\tilde{x}_i(t)$. Отримане нечітке значення $\tilde{Y}_{\text{базова}}(t)$ за допомогою методу дефаззифікації перетворюється в чітке числове значення $Y^*_{\text{базова}}(t)$ у діапазоні [0, 1].

Eman 2. На цьому кроці визначаються джерела динамічних даних. На відміну від простих лічильників, ДФВ є інтерпретованими висновками інтелектуальних систем аналізу, згаданих у працях [6], [8], [9]. Кожен такий висновок розглядається як окремий динамічний фактор (S_k). Прикладами таких факторів є:

– імовірність фішингової атаки (S_1) – чисельне значення від 0 до 1, згенероване моделлю обробки природної мови (NLP), яка аналізує текстовий контент та метадані мережевих сесій;

– рівень аномальності трафіку (S_2) – оцінка від 0 до 1, видана моделлю глибокого навчання (наприклад, Autoencoder), що навчена на нормальній поведінці мережі;

– оцінка загрози APT (S_3) – вердикт системи на основі ШІ (згідно з підходом [8]), що аналізує ланцюжки подій у часі;

– детектування атаки GAN-системою (S_4) – бінарний (0 або 1) або імовірнісний сигнал від системи, описаної в [9].

Кожному динамічному фактору впливу (S_k) експертами з інформаційної безпеки присвоюється ваговий коефіцієнт небезпеки (w_k), який відображає критичність цього фактору для загального стану безпеки.

2.2. Модель розрахунку вектора зважених оцінок подій. Для отримання єдиного показника поточної інтенсивності загроз обчислюється вектор зважених оцінок подій $V(t)$. Він відображає сумарну «вагу» всіх виявлених загроз за певний часовий інтервал *t*:

$$V(t) = \sum_{k=1}^{m} w_k \cdot S_k(t), \quad (2)$$

де m – загальна кількість ДФВ;

w_k – ваговий коефіцієнт небезпеки для *k*-го динамічного фактору;

$S_k(t)$ – поточне значення *k*-го динамічного фактору за часовий інтервал *t*.

Чим вище його значення, тим більший вплив негативних подій на безпеку.

Далі розраховується нормалізована оцінка впливу подій $\bar{Y}_{\text{подій}}(t)$ за часовий інтервал *t*:

$$\bar{Y}_{\text{подій}}(t) = \frac{V(t)}{V_{max}}, \quad (3)$$

де V_{max} – експертно визначений максимально можливий рівень загрози.

Для зручності інтерпретації (1 – краща безпека, 0 – відсутність безпеки) оцінка інвертується:

$$Y_{\text{подій}}(t) = 1 - \bar{Y}_{\text{подій}}(t). \quad (4)$$

Якщо $\bar{Y}_{\text{подій}}(t)$ перевищить 1 (тобто $V(t) > V_{max}$), що свідчить про надзвичайно високу активність загроз, то $Y_{подій}(t)$ може стати від'ємним, або його можна вважати нульовим.

Eman 3. Визначення загальної інтегральної оцінки ($Y_{загальна}$). На фінальному кроці фази динамічної оцінки відбувається інтеграція базової та динамічної оцінок для формування єдиного показника стану безпеки. Як комбінаційна функція використовується добуток, що дозволяє відобразити мультиплікативний ефект:

$$Y_{\text{загальна}}(t) = Y^{*}_{\text{базова}}(t) \times Y_{\text{подій}}(t). \quad (5)$$

Ця функція передбачає, що навіть якщо базова безпека висока ($Y_{базова} \to 1$), велика кількість поточних подій ($Y_{подій} \to 0$) значно знизить загальну оцінку, відображаючи реальне погіршення ситуації.

Отримане значення $Y_{загальна}(t)$ інтерпретується за допомогою порогових рівнів, на кшталт:

– нормальний: $Y_{загальна}(t) \geq 0{,}7$;
– попереджувальний: $0{,}5 \leq Y_{загальна}(t) < 0{,}7$;
– критичний: $Y_{загальна}(t) < 0{,}5$.

Отримана оцінка $Y_{загальна}(t)$ є не кінцевою метою, а тригером для адаптивного управління, що включає:

– моніторинг та порогові значення. Система безперервно обчислює $Y_{загальна}(t)$. Коли оцінка перетинає визначені пороги (наприклад, падає нижче 0,5, переходячи в «критичний» рівень), вона сигналізує про неприпустиме погіршення стану безпеки;

– запуск автоматизованих сценаріїв (SOAR). Сигнал від алгоритму передається на платформу оркестрації та автоматизації безпеки (SOAR). Залежно від того, які саме ДФВ (динамічні фактори від ШІ) спричинили падіння оцінки, запускається відповідний сценарій реагування (ізоляція хоста, блокування IP-адреси, посилення моніторингу);

– зворотний зв'язок та саморегуляція. Адаптація також передбачає вплив на сам алгоритм. Наприклад, якщо певний тип загрози (ДФВ) виникає постійно, система може автоматично збільшити його ваговий коефіцієнт w_k, роблячи загальну оцінку більш чутливою до цього вектора атак у майбутньому.

Таким чином, запропонований алгоритм створює замкнений цикл: ШІ-системи аналізують контент → Алгоритм агрегує їхні висновки в єдину оцінку → Оцінка запускає адаптивні дії → Дії змінюють середовище, що знову аналізується ШІ-системами. Саме це і є практичною реалізацією адаптивної безпеки.

Висновки. У статті вирішено актуальну наукову задачу розробки методологічного підходу до адаптивної оцінки стану безпеки мережевого контенту в умовах невизначеності, що спричинена динамікою сучасних кіберзагроз та різнорідністю даних.

У результаті дослідження розроблено алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту. Його ключовою особливістю є триетапна структура, що комплексно поєднує статичні та динамічні аспекти безпеки:

Етап 1. Розрахунок нечіткої базової оцінки ($Y_{\text{базова}}$) за допомогою нелінійної нечіткої регресійної моделі, що дозволяє формалізувати та обробити експертні знання про фундаментальний рівень захищеності системи.

Етап 2. Розрахунок динамічної оцінки впливу подій ($Y_{\text{подій}}$), яка інтегрує кількісні показники, отримані безпосередньо від сучасних систем штучного інтелекту (ШІ), що аналізують мережевий контент у реальному часі.

Етап 3. Синтез базової та динамічної складових у єдиний інтегральний показник ($Y_{загальна}$), що слугує обґрунтованим індикатором поточного стану безпеки.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає у створенні методу, який поєднує нелінійну нечітку модель для обробки статичних факторів із моделлю динамічної оцінки, що безпосередньо використовує висновки інтелектуальних систем аналізу. Це дозволяє формалізувати та автоматизувати процес агрегації різнорідних, неповних та неточних даних в єдиному фреймворку.

Практична цінність розробленого алгоритму полягає в тому, що він надає кількісну основу для переходу від реактивного до проактивного, ризик-орієнтованого управління безпекою. Отримана інтегральна оцінка є тригером для механізмів адаптивного реагування, зокрема для автоматизованих платформ (SOAR), що підвищує швидкість та ефективність протидії як відомим, так і раніше невідомим загрозам, посилюючи загальну стійкість.

Напрямками подальших досліджень є вдосконалення запропонованого алгоритму, що включає: розробку методів автоматичної адаптації функцій належності та калібрування нечітких коефіцієнтів (β) за допомогою машинного навчання; створення алгоритмів для динамічної оптимізації вагових коефіцієнтів (w_k); інтеграцію з системами аналізу поведінки користувачів (UEBA) та проведення повномасштабних експериментальних досліджень на реальних мережевих інфраструктурах.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Для підвищення якості рукопису автори застосували інструменти на основі штучного інтелекту (зокрема, Chat GPT) з метою усунення стилістичних та граматичних помилок. Весь згенерований або модифікований контент був ретельно перевірений, відредагований та схвалений авторами, які несуть повну відповідальність за остаточний зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Stouffer, K., Falco, J., & Scarfone, K. (2011). *Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security* (NIST Special Publication 800-82). National Institute of Standards and Technology. https://www.researchgate.net/publication/308175656_NIST_Special_Publication_800-82_Guide_to_Industrial_Control_Systems_ICS_Security.

2. Homer, J., Zhang, S., Ou, X., & Schmid, D. (2013). Aggregating vulnerability metrics in enterprise networks using attack graphs. *Journal of Computer Security, 21*(4), 561-597. https://doi.org/10.3233/JCS-130475.

3. Barford, P., & Dacier, M. (Eds.). (2017). *Cyber–security metrics and performance measurement*. Springer. https://doi.org/10.1002/9780470087923.hhs440.

4. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control, 8*(3), 338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

5. Lytvynov, V., Hrebennyk, A., Trunova, E., & others. (2021). *Principles of adaptive corporate network security management.* In S. Shkarlet, A. Morozov, & A. Palagin (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems (MODS'2020)* (pp. 289-300). Cham: Springer. *(Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1265).* http://dwl.kiev.ua/art/spring20/mmss.pdf.

6. Buczak, A. L., & Guven, E. (2016). A survey of data mining and machine learning methods for cyber security. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18*(2), 1153-1176. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502.

7. Sharafaldin, I., Lashkari, A. H., & Ghorbani, A. A. (2018). Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. *Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP)*, 108-116. https://doi.org/10.5220/0006639801080116.

8. Brandão, P. (2025). Combating advanced persistent threats through artificial intelligence: An algorithmic approach. *Open Research Europe, 5*, Article 139. https://doi.org/10.12688/openreseurope.20268.2.

9. Albalawi, T., Ganeshkumar, P., & Albalwy, F. (2025). *Strategic network attack prevention system leveraging sophisticated query-based network attention algorithm (QNAA) and self-perpetuating generative adversarial network (SPF-GAN) techniques for optimal detection*. *Electronics, 14*(5), Article 922. https://doi.org/10.3390/electronics14050922.

10. Литвинов, В. В., Казимир, В. В., Стеценко, І. В., та ін. (2017). *Методи аналізу та моделювання безпеки розподілених інформаційних систем* (С. М. Шкарлет, ред.). Чернігівський національний технологічний університет.

11. Zadeh, L. A. (1994). Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Communications of the ACM, 37*(3), 77-84. https://doi.org/10.1145/175247.175255.

12. Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 4*(2), 103-111. https://doi.org/10.1109/91.493904.

13. ISO/IEC. (2022). *ISO/IEC 27001:2022: Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements*. https://www.iso.org/standard/82875.html.

14. ISO/IEC. (2022). *ISO/IEC 15408-1:2022 – Information security, cybersecurity and privacy protection — Evaluation criteria for IT security – Part 1: Introduction and general model*. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72891/fbfa4f603f384c7ab0663ffc4c163f3f/ISO-IEC-15408-1-2022.pdf.

15. Korystin, O. Y., Korchenko, O., Kazmirchuk, S., et al. (2024). Comparative risk assessment of cyber threats based on average and fuzzy sets theory. *I. J. Computer Network and Information Security, 1*(1), 24-34. https://doi.org/10.5815/ijcnis.2024.01.02.

16. Trunov, O., Skiter, I., Dorosh, M., et al. (2024). Modeling of the information security risk of a transport and logistics center based on fuzzy analytic hierarchy process. In V. Kazymyr et al. (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems. MODS 2023* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1091, pp. 250-261). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_23.

References

1. Stouffer, K., Falco, J., & Scarfone, K. (2011). *Guide to industrial control systems (ICS) security* (NIST Special Publication 800-82). National Institute of Standards and Technology. https://www.researchgate.net/publication/308175656_NIST_Special_Publication_800-82_Guide_to_Industrial_Control_Systems_ICS_Security.

2. Homer, J., Zhang, S., Ou, X., & Schmid, D. (2013). Aggregating vulnerability metrics in enterprise networks using attack graphs. *Journal of Computer Security*, *21*(4), 561-597. https://doi.org/10.3233/JCS-130475.

3. Barford, P., & Dacier, M. (Eds.). (2017). *Cyber-security metrics and performance measurement*. Springer. https://doi.org/10.1002/9780470087923.hhs440.

4. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, *8*(3), 338-353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

5. Lytvynov, V., Hrebennyk, A., Trunova, E., Skiter, I., & Lysetskyi, Y. (2021). Principles of adaptive corporate network security management. In S. Shkarlet, A. Morozov, & A. Palagin (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems (MODS'2020)* (pp. 289-300). Springer. http://dwl.kiev.ua/art/spring20/mmss.pdf.

6. Buczak, A. L., & Guven, E. (2016). A survey of data mining and machine learning methods for cyber security. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *18*(2), 1153-1176. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502.

7. Sharafaldin, I., Lashkari, A. H., & Ghorbani, A. A. (2018). Toward generating a new intrusion detection dataset and intrusion traffic characterization. In *Proceedings of the 4th International*

Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP) (pp. 108-116). Scitepress. https://doi.org/10.5220/0006639801080116.

8. Brandão, P. (2025). Combating advanced persistent threats through artificial intelligence: An algorithmic approach. *Open Research Europe*, *5*, Article 139. https://doi.org/10.12688/openreseurope.20268.2.

9. Albalawi, T., Ganeshkumar, P., & Albalwy, F. (2025). Strategic network attack prevention system leveraging sophisticated query-based network attention algorithm (QNAA) and self-perpetuating generative adversarial network (SPF-GAN) techniques for optimal detection. *Electronics*, *14*(5), 922. https://doi.org/10.3390/electronics14050922.

10. Lytvynov, V. V., Kazymyr, V. V., Stetsenko, I. V., Trunova, O. V., Skiter, I. S., Tkach, Y. M., Hrebennyk, A. H., & Nekhay, V. V. (2017). *Metody analizu ta modeliuvannia bezpeky rozpodilenykh informatsiinykh system: monohrafiia [Methods of analysis and modeling of security of distributed information systems: A monograph].* Chernihiv National University of Technology.

11. Zadeh, L. A. (1994). Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. Communications of the ACM, 37(3), 77-84. https://doi.org/10.1145/175247.175255.

12. Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic = computing with words. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 4(2), 103-111. https://doi.org/10.1109/91.493904.

13. International Organization for Standardization. (2022). *Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements* (ISO/IEC 27001:2022). https://www.iso.org/standard/82875.html.

14. International Organization for Standardization. (2022). *Information security, cybersecurity and privacy protection – Evaluation criteria for IT security – Part 1: Introduction and general model* (ISO/IEC 15408-1:2022). https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72891/fbfa4f603f384c7ab0663ffc4c163f3f/ ISO-IEC-15408-1-2022.pdf.

15. Korystin, O. Y., Korchenko, O., Kazmirchuk, S., Demediuk, S., & Korystin, O. O. (2024). Comparative Risk Assessment of Cyber Threats Based on Average and Fuzzy Sets Theory. *I. J. Computer Network and Information Security*, *1*(1), 24-34. https://doi.org/10.5815/ijcnis.2024.01.02.

16. Trunov, O., Skiter, I., Dorosh, M., Trunova, E., & Voitsekhovska, M. (2024). Modeling of the information security risk of a transport and logistics center based on fuzzy analytic hierarchy process. In V. Kazymyr, D. Peleshko, A. Morozov, & S. Shkarlet (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems. MODS 2023* (pp. 250-261). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_23.

Отримано 21.09.2025

UDC 004.056:004.8

Alla Hrebennyk[1], Oleksii Trunov[2]

[1]Senior Lecturer at the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: grebennik.alla@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-7464-1412
Scopus Author ID: 57219054928

[2]PhD student, Lecturer at the Department of Information Technology and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: alexeytrunov1995@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0002-0321-2669
Scopus Author ID: 59337119500T

THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE AGGREGATED DYNAMIC ASSESSMENT OF THE SECURITY STATE OF NETWORK CONTENT

Amid the exponential growth of network content volume and the permanent evolution of cyber threats, traditional approaches to corporate network protection based on signature analysis are proving to be insufficient. A paradigm shift is occurring from static perimeter defense to continuous intelligent analysis of data streams. This brings to the forefront the problem of decision-making under significant uncertainty, caused by the heterogeneity, incompleteness, and imprecision of information coming from numerous security tools. Therefore, the development of a scientific and methodological apparatus for the comprehensive real-time assessment of the security state is an extremely urgent task that meets modern information security challenges.

The key scientific and practical problem is the absence of a unified, formalized methodology that would allow for a holistic assessment of the security state of network content. Existing security tools generate a large amount of unstructured data, but a mechanism for their aggregation into a single, interpretable indicator is lacking. The problem can be decomposed

into three components: 1) the problem of aggregating heterogeneous data, including static configuration parameters and dynamic verdicts from artificial intelligence systems; 2) the problem of ensuring the dynamism of the assessment for effective counteraction to adaptive, time-varying threats; 3) the problem of formalizing assessment criteria under fuzzy and incomplete input data, which requires the application of an appropriate mathematical apparatus.

The objective of this paper is to develop an algorithm for determining the aggregated dynamic assessment of the security state of network content. The proposed algorithm is intended to solve the aforementioned problems by acting as a fusion engine that synthesizes heterogeneous security indicators. It must provide a mechanism for quantifying the current level of security, considering both the fundamental reliability of the system and the current intensity of threats, and serve as a justified basis for triggering adaptive response mechanisms.

The proposed algorithm is implemented in three stages. In the first stage, a fuzzy base assessment (Y_{base}) is calculated, which reflects the static level of the system's security. This is achieved using a non-linear fuzzy regression model, with inputs being expert assessments of functional security criteria (in accordance with ISO 15408). In the second stage, a dynamic assessment of event impact (Y_{events}) is determined. Its inputs are dynamic influence factors (DIFs) – quantitative indicators generated by artificial intelligence systems (e.g., the probability of a phishing attack from an NLP model, the traffic anomaly level from a deep learning model). These indicators are weighted and normalized to obtain a single assessment of current threats. In the third stage, the base and dynamic assessments are integrated by multiplication ($Y_{total}(t) = Y^*_{base}(t) \times Y_{events}(t)$) to form the final aggregated indicator.

As a result of the research, a new scientific and methodological apparatus for assessing the security state of network content has been developed. The proposed algorithm formalizes the process of integrating heterogeneous, incomplete, and fuzzy data, combining static and dynamic aspects of security. Its key advantage is the ability to use the outputs of modern AI systems as input data, which allows for the consideration of previously unknown threats. The resulting aggregated dynamic assessment is a quantitative, interpretable indicator that can be used as a trigger for automated response systems (SOAR). This enables a shift from a reactive to a proactive security management paradigm, enhancing the overall resilience of network content against modern cyberattacks.

Keywords: *information security; network content; aggregated assessment; dynamic assessment; artificial intelligence; fuzzy logic; adaptive management.*

Fig.: 1. Table: 1. References: 16.

Гребенник А. Г., Трунов О. І. Алгоритм визначення агрегованої динамічної оцінки стану безпеки мережевого контенту. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 158-168. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-158-168.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-169-175
УДК 681.518.3:528

Микола Олегович Бялий[1], Павло Анатолійович Савков[2]

[1]ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу
Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E–mail: nikolai.bialiy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid=0009-0006-9487-1502

[2]доцент кафедри БВП
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E–mail: savkovpa@meta.ua. **ORCID:** https://orcid=0000-0002-0197-0610

ОБРАЗНО-ЗНАКОВА МОДЕЛЬ КАРТИ ЯК «ІНФОРМАЦІЙНОГО КАНАЛУ»

У теорії створення геоінформаційних систем військового призначення (ГІС ВП) провідна роль належить картографічній інформації, мірі її вимірювання та інформаційним характеристикам цієї ГІС. Для їх визначення запропоновано розглянути образно-знакову модель карти у ролі «інформаційного каналу», який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість від джерела до приймача. Ці складові необхідні для ефективного збору, аналізу і відображення просторово пов'язаних даних для системи прийняття рішень (СППР) особливо в процесі збору розвідувальної інформації і оперативного планування.

ГІС ВП ґрунтується на картографічній інформації, яка включає візуальне і просторове подання об'єктів реального світу на цифровій карті, передбачає наявність даних топографії, інфраструктури, населення, навколишнє середовище тощо. Це забезпечує моделювання реальності, надаючи користувачам можливість орієнтуватись у складних просторових відношеннях, візуалізувати складні сценарії, надавати аналітичні дані, сприяти більш ефективному плануванню і виконанню операцій, що значною мірою сприяє успіху будь-якої військової місії.

Ключові слова: *карта; інформаційний канал; топографо-геодезичне забезпечення; геоінформаційні системи військового призначення (ГІС ВП).*

Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Підготовка та успішне ведення бойових дій неможливі без актуальної та достовірної інформації про місцевість. Для гарантованої перемоги над противником необхідно досягти так званої інформаційної переваги над противником. Це дозволяє випередити його в оцінці швидкозмінної ситуації на полі бою, ухваленні правильного та найбільш ефективного рішення та плануванні ходу операції (військових дій).

Інформаційна перевага досягається передусім за рахунок обробки цифрової інформації про місцевість в інтеграції з різноманітними даними про противника та його війська. У досягненні цієї переваги важливе місце належить топографо-геодезичному забезпеченню, яке включає аерокосмічну, оптико-електронну розвідки, супутниковий зв'язок, цифрові комп'ютерні технології та методи сучасної геодезії, картографії та фотограмметрії.

Для оперативного управління динамічними системами, якими є сучасний бій, потрібні достовірні та актуальні дані про територію бойових дій, про процеси, що відбуваються на них, а також передові технології накопичення, обробки й подання інформації.

З урахуванням наведеного, питання збору й обробки інформації про просторово розподілені об'єкти на територіях бойових дій, де щільність інформації достатньо висока, є дуже актуальним завданням. Застаріла методика надання інформації особі, що приймає рішення (ОПР), у вигляді звітів і паперових карт втратила свою актуальність. Для оперативності управління об'єктами на території бойових дій необхідно використовувати геоінформаційні системи військового призначення (ГІС ВП). Сучасні ГІС ВП з їх широким спектром можливостей дозволяють наочно відобразити інформацію про конкретні об'єкти, процеси та явища на території бойових дій в їх сукупності, виявляти взаємозв'язки і просторові відношення та їх інтеграцію в єдиний інформаційний масив.

Мета дослідження. Цифрова інформація для ГІС ВП може бути представлена у вигляді електронної топографічної, географічної, авіаційної карт, плану населених пунктів, матриці висот, матриці властивостей місцевості тощо. Проведений авторами аналіз завдань, що вирішуються топографічними службами Збройних Сил України під час бойових дій, засвідчив, що має місце певне відставання в питаннях картографічного наповнення

© М. О. Бялий, П. А. Савков, 2025

ГІС ВП порівняно з арміями США та НАТО. Тому актуальними задачами виступають дослідження картографічних об'єктів ГІС ВП, зменшення похибок їх обробки та передачі інформаційними каналами та аналіз образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу, підвищення її інформативності. Максимальної інформативності карти можна досягти, коли користувач «знає все» про картографічні об'єкти і при цьому відсутні втрати інформації при її обробці, передачі та транспортуванні інформаційними каналами.

Основними завданнями дослідження є:

– огляд літературних джерел та наукових публікацій стосовно наповнення даними ГІС ВП;

– аналіз джерел похибок під час створення картографічних творів у ГІС ВП, оцінка їхніх технічних можливостей для обробки та аналізу цієї інформації;

– аналіз шляхів підвищення надійності обробки й передачі інформації, зокрема картографічної.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні засади інформаційного забезпечення національної безпеки України викладено в працях учених О. Бодрука, Ю. Бута, О. Власюка, В. Горбуліна, А. Качинського, В. Крисаченка, О. Маначинського, М. Ожевана, Б. Парахонського, С. Пирожкова, Г. Сащука, Т. Стародуб, В. Телелима, В. Толубко, В. Циганова, О. Шевченка та ін.

Розвитку математичних методів дослідження складних систем присвячені праці вчених В. М. Глушкова, М. З. Згуровського, О. Г. Івахненка, О. А. Самарського. Значний внесок у розвиток технологій імітаційного моделювання внесли вчені Н. П. Бусленко, В. Г. Зайцев , Дж. Кельтон, В. В. Литвинов , А. Лоу, А. Прицкер, А. А. Тимченко, В. М. Томашевський, Р. Шеннон, Т. Дж. Шрайбер та ін.

Проблема зовнішніх інформаційних впливів та інформаційних аспектів забезпечення національної безпеки держави досліджувалась у працях В. Бондаренка, Дж. Брауна, О. Вусатюка, Г. Джоветта, Д. Дубова, В. Зацерковного, С. Кара-Мурзи, О. Литвиненка, А. Манойла, С. Недбаєвського, О. Трофимчука, М. Ожевана, В. Петрика, Г. Почепцова. Серед закордонних авторів слід звернути увагу на дослідження З. Бжезінського, Д. Белла, М. Кастельса, Д. Дарендорфа, К. Дойча, Г. Джоветта, Дж. Ная та інших. Концептуальні проблеми війни та миру розглядаються в працях Р. Арона, К. Гаджієва, К. Клаузевіца, Б. Ліддел-Гарта, Н. Макіавеллі, Х. Мольтке, К. Поппера, П. Прудона, Є. Рибкіна, С. Тюшкевича, М. Цюрупи, А. Швейцера та ін. Із суто методологічного погляду проблему мережецентричних війн досліджували А. А. Амбарцумян , Ю. С. Затуливетер, А. О. Зінченко, В. І. Слюсар, K. Cebrowski, John J. Garstka, D. S. Alberts, Дж. Арквілла та інші.

Визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба зауважити, що питанням взаємодії образно-знакової моделі карти як інформаційного каналу, який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість від джерела (земна поверхня) до приймача, наявності похибок, що виникають при цьому, не приділялось достатньої уваги.

Метою статті є визначення кількості картографічної інформації, яка може надходити, оброблятися та передаватися користувачеві ГІС ВП з оцінкою ентропії при послідовній подачі повідомлень про картографічні об'єкти при рівноймовірному виборі об'єктів. Це дослідження сприятиме кращому розумінню можливостей та потенційного застосування військових ГІС для надання критичної інформації для військових цілей.

Виклад основного матеріалу. У теорії створення геоінформаційних систем військового призначення (ГІС ВП) провідна роль належить картографічній інформації, міра її вимірювання та інформаційні характеристики цієї ГІС. Для їх визначення пропонується розглянути образно-знакову модель карти у ролі «інформаційного каналу», який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість

від джерела до приймача. Ці складові необхідні для ефективного збору, аналізу і відображення просторово пов'язаних даних для системи прийняття рішень (СППР) особливо в процесі збору розвідувальної інформації та оперативного планування [1].

Як свідчить досвід військових операцій у Чечні, Афганістані, Іраку, Ізраїлі, основними критеріями успішного ведення бойових дій передусім слугували:

– своєчасне та повне забезпечення органів управління топографічними та спеціальними картами;

– завчасне виготовлення топографічних планів населених пунктів;

– підготовка вихідних астрономо-геодезичних даних про позиції ракетних військ і артилерії та передачу їх відповідним органам управління;

– забезпечення штабу та військ додатковою інформацією про місцевість у вигляді спеціальних фотодокументів місцевості, іншими довідковими матеріалами, виготовленими в процесі безпосередньої підготовки до бою та під час ведення бою;

– забезпечення автоматизованих систем управління військами (АСУВ), розвідки та наведення за допомогою цифрових карт, цифрових моделей місцевості;

– організація та своєчасне доведення до військ результатів топографічної розвідки місцевості та противника [2].

Розглянемо образно-знакову модель карти як «інформаційний канал», який позначає систему чи середовище реєстрації, обробки, зберігання і передачі даних про місцевість від джерела (земна поверхня) до приймача.

Згідно з методикою [3; 4; 5], крім картографічної інформації, ГІС вміщує ще й різні джерела похибок. Під час застосування ймовірнісного варіанта всі повідомлення про картографічні об'єкти, похибки їх обробки і передачі та іншу інформацію оцінюються як випадкові «об'єкти», що мають певні «інформаційні» характеристики.

Щоб визначити ці характеристики та їхні кількісні параметри, перейдемо від розгляду випадкового об'єкта до випадкового досліду над ним. Як варіант випадкового досліду можна взяти результати пошуку чи вибору картографічного об'єкта на топографічній карті.

Припустимо, що ми маємо справу з аналізом станів $a_1, a_2, \ldots, a_k$, які будуть прийняті як витоки досліду A, а значення $P_1, P_2, \ldots, P_k$ приймаємо як ймовірності цих витоків. Такий підхід дозволяє легко перейти до кількісної міри невизначеності випадкового досліду, запропонованій в [7].

Ентропія $H(P_1, P_2, \ldots P_{k)} = -\sum P_1 \cdot logp_i$ приймається як міра невизначеності випадкового досліду і позначається як *H(A)*.

Під час використання у ГІС ВП карти найчастіше має місце не один дослід, а декілька, тому необхідно розглядати використання карти як складний дослід. Наприклад, одночасно можуть бути задіяні досліди *A* і *B*.

Зазначивши кінцевий результат складного досліду як (a_i, b_i), а його ймовірність як $P(a_i, \cdot b_i) = r_{ij}$, визначимо ентропію складного досліду AB у вигляді:

$$H(AB) = -\sum\sum r_{i,j} log r_{i,j}.$$

У загальному випадку ймовірність має вигляд:

$$P(a_i b_i) = P(a_i)P(b_i|a_i) = P(b_j) \cdot (a_i|b_j)$$

Якщо a_i є витік досліду *A*, то ймовірність витоків $b_j (I = 1,2, \ldots, l)$ досліду *B* у цьому випадку визначиться умовними ймовірностями $P(b_j|a_i)$.

Тому функція $H(B \mid a_i) = -\Sigma P(b_j \mid a_i) \log P(b_j \mid a_i)$ буде умовною ентропією досліду B при появі витоку a_i.

Математичне очікування значення $H(B \mid a_i)$ при усіх витоках a_i має назву середньоумовної ентропії досліду B при виконанні досліду A і позначається

$$H_A(B) = \sum_P (a_i) H(B|a_i).$$

Різниця $H(B) - H_A(B)$ характеризує середню зміну невизначеності досліду B після виконання досліду A, тому її визначають як середнє значення інформації про дослід B, отриманої як результат здійснення досліду:

$$I(A,B) = H(B) - H_A(B).$$

Очевидно, що

$$I(A,A) = H(A) = I(A),$$

тобто ентропія досліду є власною інформацією досліду A про самого себе.

Припустимо, що є система переробки й передачі картографічної інформації, у якій на вхід надходить a_n – вхідне повідомлення n про картографічний об'єкт, β_n – вихідне повідомлення, створене системою, коли на вхід поступає a_n і система обробки перебуває у стані γ_n.

Тоді визначимо ГІС ВП як ймовірнісну модель у наступному вигляді:

$$\beta_n = f(a_n, \gamma_n); \quad \gamma_{n+1} = q(a_n, \gamma_n),$$

де γ_n – стан системи обробки до моменту залучення n-го вхідного повідомлення.

Таке визначення дозволяє в загальному вигляді розглядати земну поверхню як ймовірнісне джерело, яке створює послідовні повідомлення про картографічні об'єкти з обмеженого набору об'єктів, а ГІС ВП як систему обробки послідовностей повідомлень, що надходять на вхід і передачі їх на виході користувачеві.

Висновки про просторові характеристики ГІС ВП почнемо з основної з них – кількості картографічної інформації, яка може надходити, оброблятися і передаватися користувачеві ГІС ВП. З цією метою скористуємося визначенням інформації і ГІС. Очевидно, що ентропія вхідних повідомлень про картографічні об'єкти $H(a)$ в результаті обробки картографічної інформації перейде в ентропію вихідних повідомлень $H(\beta)$. Тоді інформативну обробку в ГІС ВП можна визначити як кількість інформації, яка дорівнює:

$$I_{\text{обр}} = I(f(a,\beta),\beta.$$

Функція $I_{\text{обр}}$ характеризується значенням інформації про картографічні об'єкти місцевості в ГІС ВП за результатами обробки вихідних даних. У випадку, коли бази геоданих зберігають «усе» про картографічні об'єкти і $I(a) = I(\beta)$, інформативність обробки в ГІС буде максимальною.

Справедлива нерівність $I(a) = I(\beta)$ $I(a) \geq I(\beta)$, тобто коли в результаті обробки інформація не збільшується.

Загалом під час розрахунку інформативності обробки картографічної інформації в ГІС ВП передусім необхідно врахувати кількість картографічних об'єктів, повідомлення про які занесені до бази даних (БД), кількість збережених числових і атрибутивних показників та характеристик об'єктів, а також показники частоти звернення до цих даних (вірогідність вибору).

Далі, якщо визначити випадкове значення η як повідомлення, залучені користувачем, то можна вести мову й про ентропію користувача $H(\eta)$. У результаті отримаємо кількість інформації, яку надає ГІС:

$$I_{\text{ГІС}} = \min\,(I(\eta), I(\beta)).$$

Інформативність – одна з найважливіших характеристик ГІС. Вона максимальна, коли користувач «знає все» про картографічні об'єкти й відсутні втрати інформації під час її обробки і транспортування.

Серед інших характеристик ГІС треба визначити ще одну, не менш важливу характеристику – пропускну спроможність обробки й передачі картографічної інформації користувачем.

Якщо подати на ГІС випадкову величину L, то на виході, як результат обробки і випадкових помилок, отримаємо величину β, а користувач отримає випадкову величину. У такий спосіб можна розрахувати кількість інформації $I(a,\eta)$ користувача відносно входу ГІС. При варіюванні випадкової величини L на вході системи кількість інформації $I(a,\beta)$ на виході теж може змінюватися. Тоді значення $C_{max} = (I(a,\beta), I\ (a,\eta)$ можна вважати пропускною здатністю ГІС ВП.

C_{max} характеризує максимальну кількість інформації, яка може бути опрацьована й передана ГІС за одиницю часу, тобто визначає швидкість, з якою ведеться надійне транспортування інформації. Цю характеристику можна поширити й на обробку й передачу картографічної інформації.

Швидкість обробки та передачі інформації визначається формулою:

$$R = \frac{k}{t},$$

де k – кількість одиниць картографічної інформації;

t – час, що витрачається на обробку або передачу k одиниць інформації.

У праці [7] було доведено, що можна здійснити якісну й надійну обробку/передачу інформації зі швидкістю, яка не перевищує пропускну здатність каналу. З іншого боку, будь-який спосіб обробки й передачі інформації зі швидкістю, яка перевищує пропускну здатність, призводить до збільшення ймовірності похибок, яка характеризується показником надійності, під яким розуміють ймовірність появи помилки.

Отже, ще однією із важливих характеристик обробки та передачі картографічної інформації в ГІС ВП є її надійність, що визначається як ймовірність появи помилки (картографічне повідомлення β на виході та η – повідомлення, отримане користувачем, різняться від повідомлення L на вході). Ймовірність похибки назвемо $P(e)$.

$$P(e) = L(f(I(a,\eta).$$

У загальному випадку помилки в системі зменшують надійну обробку й передачу інформації та гальмують її вихід.

Для підвищення надійності обробки й передачі інформації, зокрема картографічної, важливу роль відіграє спосіб її кодування.

Аналіз об'єктів місцевості, що здійснюється сучасними ГІС, за даними [8] свідчить, що загальна кількість класифікаційних ознак картографічних об'єктів не перевищує значення 900 (760 безпосередньо ознаки об'єктів і 140 підписи до цих об'єктів). У цьому випадку джерела картографічної інформації, що забезпечують послідовну подачу повідомлень про картографічні об'єкти при рівноймовірному виборі об'єктів, мають ентропію, яка дорівнює:

$$H_з = -\sum \frac{1}{900} \log\left(\frac{1}{900}\right) = log900 = 2{,}95\ \textit{знак/об'єкт}$$

Таким чином, для кодування картографічних об'єктів як повідомлень достатньо в середньому три десятинні знаки, звідси, стосовно підсистеми ГІС ВП, об'єм бази даних рівня бригади складає щонайменше 500 Мб (це 20-25 тис. користувачів). Об'єм семантичної інформації на 1 користувача ~ 2 Кб.

Висновки. Образно-знакове кодування є важливим аспектом підвищення надійності та передачі картографічної інформації. Для ГІС ВП актуальними завданнями сьогодення є спрощення та стандартизація картографічних даних, забезпечення можливості ефективного пошуку, аналізу та візуалізації даних у ГІС та зниження ризику помилок і забезпечення сумісності даних між різними програмними засобами та системами. При цьому можуть використовуватись алфавітно-цифрові коди для позначення об'єктів, які легко розпізнаються за кодом, класифікаційні коди, що відображають класифікацію. Можуть використовуватись ієрархічні моделі, які мають кілька рівнів класифікації, сіткові моделі, які кодуються за допомогою координатної сітки або іншої системи координат. Можуть використовуватись міжнародні стандарти ISO 19115, INSPIRE Data Specifications, Національні стандарти ДСТУ або інші нормативні документи, що регулюють кодування картографічної інформації.

Список використаних джерел

1. Бялий, М. (2024). Оцінка інформативності геоінформаційних систем військового призначення. *Technical Sciences and Technologies*, (3(37)), 132-142. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142.

2. Evglevsky, I.V., & Morozov, N.N. 2005. Opyt TGO boyevykh deystviy voysk v 21 veke. *Nauka i voyennaya bezopasnost, 2*, pp.39-43.

3. Konon, N. I. (2001). On the information characteristics of geographic information systems. *Geodesy and Cartography*, (4), 43-46.

4. Konon, N. I. (2001). Concept of a mathematical model of geographic information systems. *Geodesy and Cartography*, (6), 48-54.

5.Konon, N. I. (2000). Introduction to the issues of information support for geographic information systems. Moscow: Nedra.

6.Shannon, C. (1963). *Works on information theory and cybernetics*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature.

7. Кравців, С., Іванов, Є., & Войтків, П. (2025). *Картографія: теорія і практика*. Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка.

References

1.Bilayi, M. (2024). Otsinka informatyvnosti heoinformatsiinykh system viiskovoho pryznachennia [Assessment of the informativeness of military geoinformation systems.] *Tekhnichni nauky i tekhnolohii - Technical Sciences and Technologies,* (3(37)), 132-142. https://doi.org/ 10.25140/2411-5363-2024-3(37)-132-142.

2. Evglevsky, I.V., & Morozov, N.N. 2005. Opyt TGO boyevykh deystviy voysk v 21 veke. *Nauka i voyennaya bezopasnost, 2*, pp.39-43.

3. Konon, N. I. (2001). On the information characteristics of geographic information systems. *Geodesy and Cartography*, (4), 43-46.

4. Konon, N. I. (2001). Concept of a mathematical model of geographic information systems. *Geodesy and Cartography*, (6), 48-54.

5. Konon, N. I. (2000). Introduction to the issues of information support for geographic information systems. Moscow: Nedra.

6. Shannon, C. (1963). *Works on information theory and cybernetics*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature.

7. Kravtsiv, S., Ivanov, Ye., & Voitkiv, P. (2025). Kartohrafiia: teoriia i praktyka. [Cartography: theory and practice.], *Lviv: Lvivskyi natsionalnyi universytet imeni Ivana Franka – Lviv: Ivan Franko National University of Lviv.*

Отримано 11.09.2025

UDC 681.518.3:528

Mykola Bialyi[1], Pavlo Savkov[2]

[1]Adjunct, Scientific and Organizational Department
Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
E-mail: nikolai.bialiy@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-9487-1502
[2]Associate Professor
Department of BVP Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)
E-mail: savkovpa@meta.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0197-0610

FIGURATIVE-SIGN MODEL OF THE MAP AS AN "INFORMATION CHANNEL"

In the theory of developing military geographic information systems (MGIS), a leading role belongs to cartographic information, its measurement, and the information characteristics of these systems. To define these aspects, it is proposed to consider the figurative-sign model of the map as an "information channel", which represents a system or environment for registering, processing, storing, and transmitting terrain data from the source to the receiver. These components are essential for the effective collection, analysis, and visualization of spatially related data within a decision support system (DSS), especially in the processes of intelligence gathering and operational planning.

MGIS is based on cartographic information, which includes the visual and spatial representation of real-world objects on a digital map. It presupposes the availability of data on topography, infrastructure, population, and the environment, thereby enabling the modeling of reality. This provides users with the ability to navigate complex spatial relationships, visualize sophisticated scenarios, deliver analytical data, and support more effective planning and execution of operations–factors that significantly contribute to the success of any military mission.

Keywords: *map; information channel; topographic and geodetic support; military geographic information systems (MGIS).*

References: 7.

Бялий М. О., Савков П. А. Образно-знакова модель карти, як "інформаційного каналу". *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 169-175. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-169-175.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-176-184
УДК 004.02

Сергій Ігорович Волощук[1], Володимир Юрійович Савінов[2]

[1]аспірант кафедри комп'ютерної інженерії
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили (Миколаїв, Україна)
E-mail: serhii.voloshchuk@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-3169-7316

[2]кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії
Чорноморський національний університет ім. Петра Могили (Миколаїв, Україна)
E-mail: volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0862-5879

ДОСЛІДЖЕННЯ СИМУЛЯЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЮ ЧАСТИНОК ТА МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ В MATLAB

У роботі представлено підхід до підвищення енергоефективності батарей пристроїв Інтернету речей шляхом застосування гібридного алгоритму оптимізації, що поєднує метод рою частинок та мурашиний алгоритм. Запропонований підхід орієнтований на мінімізацію енергоспоживання при збереженні стабільної продуктивності системи. Дослідження виконано за допомогою симуляційного моделювання в середовищі MATLAB, що дозволило оцінити ефективність алгоритму на різних сценаріях роботи IoT-пристроїв. Результати експериментів продемонстрували зменшення енергоспоживання батарей порівняно з традиційними методами оптимізації, а також покращення часу роботи пристроїв без підзарядки. Отримані висновки підтверджують доцільність інтеграції гібридних алгоритмів оптимізації d системи Інтернету речей з метою забезпечення більшої автономності та довговічності сенсорних вузлів.

Ключові слова: *енергоефективність; Інтернет речей; оптимізація; батарея; MATLAB; алгоритм рою частинок; мурашиний алгоритм.*

Рис.: 1. Табл.: 7. Бібл.: 4.

Актуальність теми дослідження. Стрімке зростання екосистеми Інтернету речей робить проблему енергоефективності однією з ключових у сучасних науково-технічних дослідженнях. Мільярди пристроїв, що функціонують на батарейному живленні, потребують нових підходів до продовження автономної роботи без втрати продуктивності та надійності.

Традиційні методи управління енергоспоживанням дійсно виявляються недостатніми для динамічних умов експлуатації, що підтверджується численними дослідженнями останніх років. Впровадження гібридних алгоритмів оптимізації може бути перспективним напрямком, хоча їх ефективність значною мірою залежить від специфіки конкретного застосування.

Поєднання рою частинок і мурашиного алгоритму теоретично дозволяє формувати адаптивні стратегії управління енергією. Проте, як показав аналіз літератури, подібні гібридні підходи часто страждають від підвищеної обчислювальної складності, що може нівелювати переваги від економії енергії. Актуальність роботи зумовлена не лише технічними викликами, а й зростаючими вимогами до екологічної сталості цифрових систем.

Постановка проблеми. Швидке зростання кількості IoT-пристроїв справді супроводжується збільшенням потреб в енергоефективності. Однак варто зауважити, що більшість вузлів не працює «виключно» на батарейному живленні – існують гібридні системи живлення та технології збирання енергії (energy harvesting). Традиційні підходи, засновані на статичних стратегіях, мають свої переваги у вигляді простоти реалізації та передбачуваності поведінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У новітніх роботах спостерігається помітний зсув від «чистих» роїнних методів до їх гібридизації, що дозволяє гнучкіше балансувати між глобальним пошуком і локальною експлуатацією розв'язку.

Зокрема у статті R. D. Joshi та співавторів [1] запропоновано протокол SIACOPSO, який комбінує ACO для вибору кластер-голів і багатострибкової маршрутизації з PSO для оптимізації розміщення вузлів і ребалансування навантаження. За результатами моделювання (NS v2.34) гібрид продемонстрував нижче енергоспоживання та довший час

© С. І. Волощук, В. Ю. Савінов, 2025

життя мережі порівняно з ACO та AODV, що емпірично підтверджує доцільність інтеграції двох біоінспірованих парадигм у WSN/IoT-сценаріях.

Суміжна тенденція простежується і у роботі S. Sharmin та співавторів [2], де гібридний PSO поєднано з поліпшеним LEACH (HPSO-ILEACH) для вибору кластер-голів і агрегування даних. Автори фіксують зменшення середнього енергоспоживання (~28 %) і збільшення частки «живих» вузлів (≈55 % після тривалих раундів), що засвідчує ефект від поєднання еволюційного пошуку з доменно-специфічною евристикою кластеризації.

Подібний підхід представлено Lenin K. та співавторами [3], де ACO та PSO було об'єднано для зниження втрат активної потужності у великих енергетичних системах, що підтвердило ефективність гібридизації біоінспірованих методів.

Крім того, у нещодавній роботі Zhang Y. та співавторів [4] запропоновано енергоефективний протокол маршрутизації для гетерогенних сенсорних мереж, який поєднує PSO з динамічною кластеризацією, що забезпечило суттєве зниження енергоспоживання вузлів та підвищення стабільності мережі.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість робіт, присвячених оптимізації енергоспоживання у бездротових сенсорних мережах та системах Інтернету речей, залишається низка аспектів, які досліджені недостатньо. Зокрема, більшість наявних публікацій фокусуються або на алгоритмах рою частинок, або на мурашиних алгоритмах як самостійних методах. Глибока інтеграція цих підходів із формуванням гібридних стратегій оптимізації все ще перебуває на початковому етапі розвитку, а результати таких робіт є поодинокими. Недостатньо уваги приділяється і прогнозному моделюванню енергетичних потреб пристроїв, що може суттєво вплинути на ефективність управління енергією в динамічних умовах.

Крім того, більшість існуючих досліджень обмежуються тестуванням алгоритмів на спрощених моделях без урахування впливу таких факторів, як деградація батарей, температурні коливання чи масштабованість при великій кількості вузлів. Саме ці прогалини й стали об'єктом фокусування цієї роботи. Запропонований підхід поєднує сильні сторони рою частинок і мурашиного алгоритму з прогнозними можливостями нейронних мереж, що дозволяє створити більш реалістичну та адаптивну основу для управління енергоспоживанням пристроїв IoT.

Метою статті є підвищення енергоефективності пристроїв Інтернету речей шляхом розробки та симуляції гібридного алгоритму, який поєднує метод рою частинок і мурашиний алгоритм у MATLAB.

Екосистема Інтернету речей охоплює мільярди підключених пристроїв, які переважно покладаються на батарейне живлення для функціонування. Ці пристрої, від датчиків навколишнього середовища до розумних побутових приладів, стикаються з фундаментальним викликом максимізації операційного терміну служби при збереженні необхідних рівнів продуктивності. Традиційні підходи до управління живленням застосовують статичні стратегії, які не здатні адаптуватися до динамічних операційних умов, що призводить до субоптимального використання енергії та скорочення тривалості роботи пристроїв.

Покращення енергоефективності батарей у пристроях IoT потребує складних алгоритмів, здатних збалансувати множинні конкуруючі цілі: мінімізацію енергоспоживання, підтримання надійності зв'язку, забезпечення цілісності даних та продовження операційного терміну служби. Складність цієї задачі зростає експоненційно зі збільшенням кількості пристроїв, протоколів зв'язку та змінних середовища.

Це дослідження розглядає такі виклики шляхом впровадження нового гібридного алгоритму, що поєднує оптимізацію рою частинок із мурашиним алгоритмом оптимізації та елементами машинного навчання у симуляційному середовищі MATLAB для розробки адаптивної системи управління енергією для пристроїв IoT. Дослідження зосереджується на створенні комплексної концептуальної основи, яка може динамічно регулювати параметри енергоспоживання на основі операційних умов реального часу та прогнозованих майбутніх потреб.

Виклад основного матеріалу. MATLAB було обрано як основну платформу для симуляції завдяки комплексному пакету оптимізації, потужним можливостям чисельного обчислення та широкій підтримці бібліотек для моделювання систем IoT. Пакет глобальної оптимізації забезпечує нативну реалізацію ОРЧ, тоді як додатково розроблений модуль ACO дозволяє гібридну оптимізацію. Пакет комунікацій дозволяє реалістичне моделювання протоколів бездротового зв'язку, що зазвичай використовуються в розгортаннях IoT.

Симуляційне середовище включає декілька ключових пакетів MATLAB: пакет обробки сигналів для аналізу даних сенсорів, пакет статистики та машинного навчання для прогнозного моделювання енергетичних потреб, пакет нейронних мереж для адаптивного управління параметрами та пакет паралельних обчислень для прискорення великомасштабних симуляцій.

Новий гібридний алгоритм було розроблено для оптимізації семи критичних параметрів, що впливають на енергоспоживання пристроїв IoT: рівні потужності передачі, тривалість циклів сну, частоти дискретизації сенсорів, коефіцієнти стиснення даних, інтервали планування комунікації, адаптивні порогові значення та прогнозні коефіцієнти навантаження. Алгоритм підтримує рій з 50 частинок з додатковою феромонною матрицею для мурашиного компонента.

Ключові нововведення:

1. Адаптивна інерційна вага – замість лінійного зменшення використовується динамічна формула:

$$w(t) = (w_{max} - w_{min}) \times ex\left(-\beta \times diversity(t)\right) + w_{min}, \quad (1)$$

де diversity(t) – міра різноманітності рою на ітерації t.

2. Феромонні сліди ACO – кожна успішна конфігурація залишає феромонний слід:

$$\tau(i,j) = (1-p) \times \tau(i,j) + \Delta\tau(i,j), \quad (2)$$

де ρ – коефіцієнт випаровування;

Δτ(i,j) – приріст феромону.

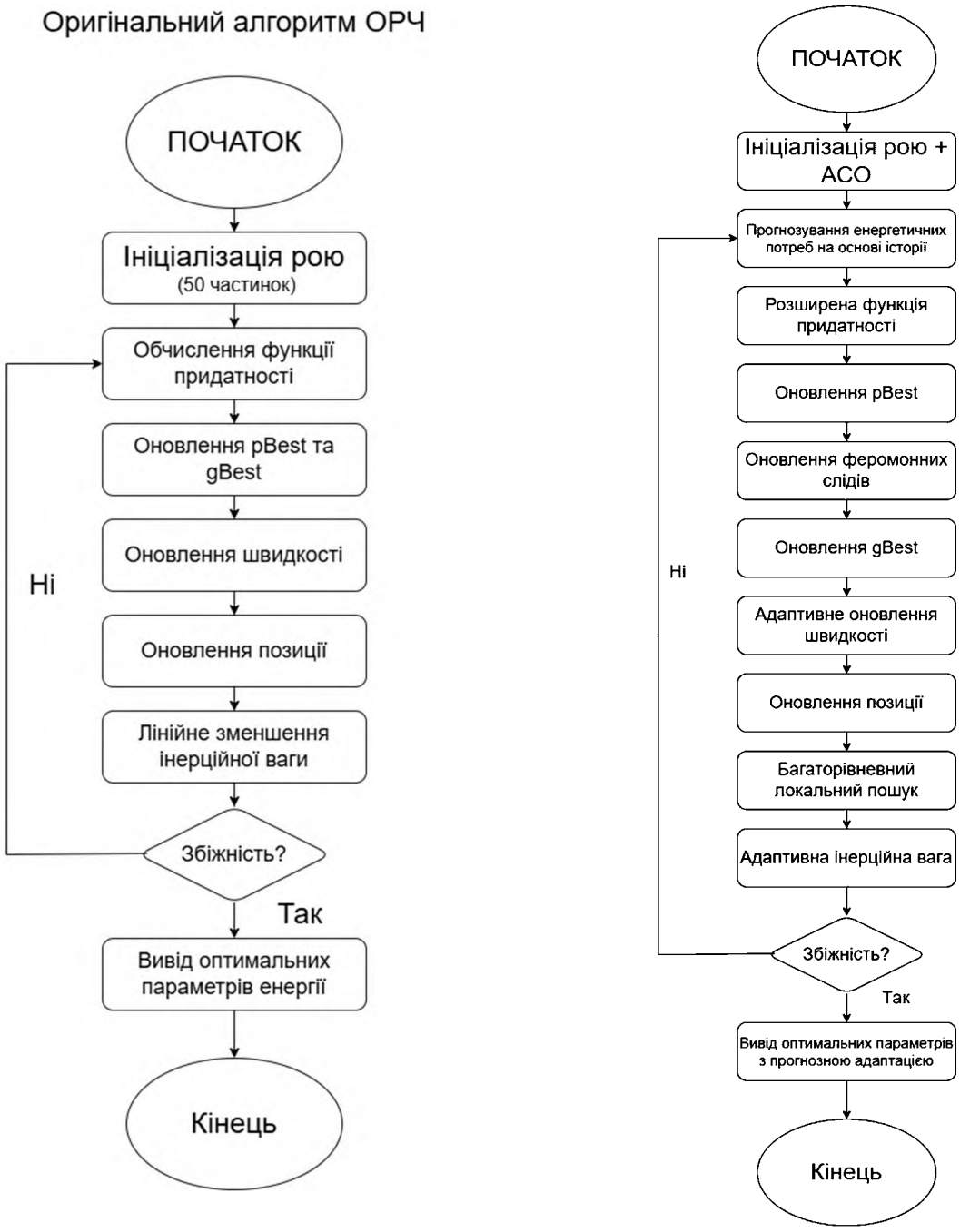
3. Прогнозне моделювання – нейронна мережа LSTM передбачає майбутні енергетичні потреби на основі історичних даних.

4. Багаторівневий локальний пошук – табу-пошук для уникнення локальних мінімумів.

Параметри гібридного алгоритму: адаптивна інерційна вага (0,4-0,9), когнітивний коефіцієнт прискорення 2,1, соціальний коефіцієнт прискорення 1,9, коефіцієнт феромону α = 0,1, коефіцієнт випаровування ρ = 0,02.

Для наочного представлення відмінностей між оригінальним та покращеним підходами нижче представлені блок-схеми обох алгоритмів (рис. 1).

Як видно з порівняння, гібридний підхід включає додаткові етапи прогнозного моделювання, оновлення феромонних слідів, багаторівневий локальний пошук та адаптивне управління параметрами, що забезпечує значно кращу продуктивність.



а *б*

Рис. 1. Алгоритм роботи:
а – оригінальний алгоритм ОРЧ; б – покращений гібридний алгоритм ОРЧ-АСО
Джерело: розроблено авторами.

Розширена функція придатності включає прогнозний компонент:

$$F = 0{,}35 \times \text{Енергія} + 0{,}25 \times \text{Зв}'\text{язок} + 0{,}2 \times \text{Якість} + 0{,}15 \times \text{Відгук} + 0{,}05 \times \text{Прогноз}$$

Симуляція моделює гетерогенні пристрої IoT з розширеними профілями енергоспоживання. Кожна модель пристрою включає реалістичні динамічні шаблони енергоспоживання для основних операційних станів: активне зондування (12-28 мА), обробка даних (6-15 мА), бездротова передача (25-50 мА), локальна обробка машинного навчання

(18-35 мА) та режим сну (0,3-2,5 мА). Ємність батареї коливається від 800 мАг для найменших сенсорів до 6000 мАг для розумних пристроїв-шлюзів.

Додано моделювання деградації батареї з часом та температурні ефекти на ємність батареї, що робить симуляцію більш реалістичною.

Симуляція виконувала 1000 пристроїв IoT протягом 30 днів безперервної роботи, генеруючи 720 000 точок даних для комплексного аналізу. Гібридна система управління енергією ОРЧ-АСО продемонструвала значні поліпшення порівняно як з базовими статичними підходами, так і з оригінальним алгоритмом ОРЧ. У табл. 1 наведено порівняння енергоспоживання за категоріями пристроїв.

Таблиця 1 – Порівняння енергоспоживання за категоріями пристроїв

Категорія пристроїв	Базовий показник (мВт*год/день)	ОРЧ (мВт*год/день)	ОРЧ-АСО гібрид (мВт*год/день)	Економія проти базового (%)	Покращення проти ОРЧ (%)	Подовження терміну служби (%)
Датчики навколишнього середовища	125,4	74,2	67,8	45,9	8,6	47,1
Пристрої розумного дому	168,7	121,5	110,3	34,6	9,2	35,8
Промислові датчики IoT	152,9	97,8	88,4	42,2	9,6	43,5
Пристрої-шлюзи	245,6	172,3	156,7	36,2	9,1	37,4
Носимі пристрої	89,3	58,7	52,1	41,7	11,2	43,2
Середнє значення	142,3	92,7	85,1	40,2	9,5	41,4

Джерело: розроблено авторами.

Середнє добове енергоспоживання зменшилося з 142,3 мВт·год на пристрій (базовий показник) до 85,1 мВт·год на пристрій (ОРЧ-АСО гібрид), що становить 40,2 % скорочення використання енергії. Гібридний алгоритм досягав збіжності в середньому за 132 ітерації, що на 11 % швидше за оригінальний ОРЧ, при цьому глобальне найкраще рішення стабілізувалося приблизно після 175 ітерацій. У табл. 2 наведені метрики продуктивності гібридного алгоритму.

Таблиця 2 – Метрики продуктивності гібридного алгоритму ОРЧ-АСО

Метрика продуктивності	ОРЧ-АСО гібрид	Оригінальний ОРЧ	Покращення	Стандартне відхилення	Довірчий інтервал (95 %)
Ітерації збіжності	132,4	148,7	11,0 %	19,7	127,3-137,5
Стабілізація глобального оптимуму	174,8	201,3	13,2 %	26,3	169,6-180,0
Значення функції придатності	0,891	0,847	5,2 %	0,071	0,878-0,904
Час оптимізації (секунди)	923,7	847,2	-9,0 %*	134,2	897,4-950,0
Оцінка якості рішення	0,956	0,923	3,6 %	0,058	0,945-0,967
Стабільність рішення	0,934	0,889	5,1 %	0,063	0,924-0,944

*Незначне збільшення часу обчислень через додаткові компоненти АСО та МН.

Джерело: розроблено авторами.

Подовження терміну служби пристроїв варіювалося залежно від сценарію розгортання: датчики моніторингу навколишнього середовища показали 47 % поліпшення терміну служби, пристрої розумного дому досягли 36 % подовження, а промислові датчики IoT продемонстрували 44 % поліпшення. Ці результати відображають здатність гібридного алгоритму ефективніше адаптувати стратегії оптимізації до конкретних вимог застосувань та операційних обмежень.

Процес оптимізації підтримував надійність зв'язку вище 97,2 % в усіх тестових сценаріях, одночасно зменшуючи потужність передачі в середньому на 26,8 %. Коефіцієнти доставки пакетів покращилися та залишалися в межах відмінних діапазонів (97,1 % до 99,1 %) завдяки інтелектуальному прогнозуванню якості каналу зв'язку. Табл. 3 демонструє продуктивність зв'язку в різних мережах.

Таблиця 3 – Аналіз продуктивності зв'язку

Сценарій мережі	Коефіцієнт доставки пакетів (%)	Середня затримка (мс)	Зменшення потужності передачі (%)	Якість сигналу (дБм)	Прогнозна точність (%)
Щільна міська зона	97,1 (+0,9)	251 (-16)	22,3 (+3,8)	-71,2 (+1,2)	94,3
Приміська житлова зона	98,4 (+0,6)	218 (-16)	28,7 (+4,6)	-67,8 (+1,1)	96,1
Сільська сільськогосподарська зона	98,8 (+0,7)	173 (-16)	31,2 (+4,5)	-64,1 (+1,1)	97,4
Промисловий комплекс	97,6 (+0,7)	267 (-22)	23,8 (+4,5)	-72,9 (+1,2)	93,7
Розумна будівля	99,1 (+0,4)	186 (-15)	30,1 (+4,3)	-65,4 (+1,3)	98,2
Середнє значення	98,2 (+0,7)	219 (-17)	27,2 (+4,3)	-68,3 (+1,2)	95,9

*Числа в дужках показують покращення порівняно з оригінальним ОРЧ
Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 демонструє наявні помилки системи.

Таблиця 4 – Метрики якості даних та помилок

Тип помилки	Базова система (%)	ОРЧ (%)	ОРЧ-АСО гібрид (%)	Коефіцієнт поліпшення	Точність виявлення (%)
Хибно позитивні	0,47	0,29	0,21	2,24x	98,1
Хибно негативні	0,23	0,15	0,11	2,09x	99,2
Помилки передачі	1,12	0,68	0,48	2,33x	99,6
Пошкодження даних	0,31	0,19	0,14	2,21x	99,9
Помилки синхронізації	0,89	0,54	0,38	2,34x	99,4

Джерело: розроблено авторами.

Затримка мережі зменшилася на 7,2 % завдяки інтелектуальному прогнозуванню оптимальних вікон передачі (середня затримка: 219 мс порівняно з 236 мс оригінального ОРЧ та 245 мс базового підходу). Гібридний алгоритм успішно покращив баланс між економією енергії та вимогами до продуктивності.

Гібридний алгоритм продемонстрував покращені характеристики масштабованості, з обчислювальною складністю, що зростає логарифмічно завдяки ефективному кешуванню феромонних слідів. Час симуляції для 1000 пристроїв становив у середньому 51 хвилину на стандартному обладнанні (Intel Core i7-13700K, 32 ГБ ОЗП), що лише на 8,5 % більше за оригінальний ОРЧ при значно кращій якості рішень. У табл. 5 наведено аналіз масштабованості продуктивності алгоритму.

Таблиця 5 – Аналіз масштабованості продуктивності

Розмір мережі (пристрої)	Час симуляції (хвилини)	Використання пам'яті (ГБ)	Завантаження ЦП (%)	Оцінка якості збіжності	Прогнозна точність (%)
100	4,6 (+ 0,4)	2,3 (+ 0,2)	36,8 (+ 2,3)	0,958 (+ 0,017)	97,2
250	12,8 (+ 1,1)	5,2 (+ 0,4)	45,1 (+ 2,8)	0,951 (+ 0,016)	96,8
500	25,7 (+ 2,3)	10,1 (+ 0,9)	59,4 (+ 2,7)	0,944 (+ 0,016)	96,3
750	38,6 (+ 3,5)	14,9 (+ 1,3)	72,1 (+ 3,2)	0,939 (+ 0,015)	95,9
1000	51,2 (+ 4,0)	19,8 (+ 1,7)	81,5 (+ 3,3)	0,934 (+ 0,013)	95,5
1500	78,9 (+ 7,1)	29,4 (+ 2,5)	92,7 (+ 3,3)	0,928 (+ 0,011)	94,8

Джерело: розроблено авторами.

У табл. 6 продемонстровано вплив навколишнього середовища на продуктивність.

Таблиця 6 – Вплив навколишнього середовища на продуктивність алгоритму

Умови навколишнього середовища	Економія енергії (%)	Ітерації збіжності	Час адаптації (години)	Індекс стабільності	Точність прогнозу (%)
Стабільна температура (20 °C)	42,1 (+ 5,9)	128 (+ 14)	1,8 (+ 0,3)	0,96 (+ 0,02)	98,4
Змінна температура (від -10 °C до 40 °C)	37,4 (+ 5,6)	145 (+ 22)	2,9 (+ 0,5)	0,91 (+ 0,04)	96,2
Висока вологість (> 80 % відносної вологості)	34,8 (+ 5,4)	164 (+ 25)	3,6 (+ 0,6)	0,88 (+ 0,05)	94,7
Сигнальні перешкоди (міські умови)	33,2 (+ 5,3)	178 (+ 25)	4,3 (+ 0,8)	0,84 (+ 0,05)	93,1
Екстремальні умови	29,4 (+ 4,8)	201 (+ 33)	5,9 (+ 0,9)	0,78 (+ 0,06)	91,3

Джерело: розроблено авторами.

Інтегрована LSTM нейронна мережа продемонструвала високу точність у прогнозуванні енергетичних потреб пристроїв IoT. Модель навчалася на перших 7 днях операцій та адаптувалася щоденно. У табл. 7 наведено продуктивність прогнозного моделювання.

Таблиця 7 – Продуктивність прогнозного моделювання

Тип прогнозу	Точність (%)	Час навчання (хв)	Час інференції (мс)	RMSE	MAE
Короткостроковий (1-6 годин)	97,8	12,4	2,3	0,023	0,018
Середньостроковий (1-3 дні)	94,6	18,7	3,1	0,041	0,035
Довгостроковий (1-2 тижні)	89,3	25,2	4,8	0,067	0,058
Сезонні коливання	92,1	31,8	6,2	0,052	0,044

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження демонструє, що гібридна оптимізація енергоспоживання на основі ОРЧ-АСО з елементами машинного навчання забезпечує суттєві переваги для управління батареями пристроїв IoT. Поєднання колективного інтелекту рою частинок з пам'яттю мурашиного алгоритму та прогнозними можливостями нейронних мереж створює синергетичний ефект, що приводить до кращих рішень, ніж кожен компонент окремо.

Здатність алгоритму одночасно оптимізувати множинні конкуруючі цілі при збереженні та навіть покращенні продуктивності системи робить його особливо придатним для різноманітних сценаріїв розгортання IoT. Феромонні сліди дозволяють системі «пам'ятати» успішні конфігурації та швидше адаптуватися до подібних умов у майбутньому.

Адаптивний характер запропонованого процесу оптимізації, доповненого прогнозним моделюванням, у теорії дозволяє пристроям проактивно реагувати на зміни умов навколишнього середовища. Втім, точність прогнозування в реальних умовах може бути недостатньою через непередбачуваність багатьох факторів впливу.

Практичне впровадження гібридної концепції стикається з серйозними обмеженнями обчислювальних ресурсів IoT-пристроїв. Запропонована ієрархічна архітектура, де прості пристрої виконують локальні оптимізації, а складніші обчислення делегуються шлюзам або хмарній інфраструктурі, може призвести до додаткових затримок та залежності від мережевого з'єднання.

Дослідження виявило декілька критичних факторів впровадження: потребу в точніших моделях енергоспоживання з урахуванням прогнозних компонентів, надійних протоколах зв'язку для оновлення параметрів та синхронізації феромонних матриць, механізмах відмовостійкості для запобігання системним збоям та періодичному оновленні моделей машинного навчання.

Початкова фаза навчання системи потребує 5-7 днів для накопичення достатньої кількості даних для ефективної роботи прогнозних моделей, що слід враховувати при плануванні розгортання.

У той час, як федеративне навчання дійсно може покращити приватність і зменшити навантаження на мережу, його використання у пристроях IoT, які мають обмежені ресурси, залишається технічно складним завданням. Попри те, що інтеграція з відновлюваними джерелами енергії вимагає додаткових досліджень щодо їх надійності. Враховуючи поточний стан квантових обчислень, говорити про квантові алгоритми оптимізації видається дещо передчасним.

Висновки. Це дослідження успішно демонструє переваги гібридного алгоритму оптимізації рою частинок мурашиного алгоритму з елементами машинного навчання для управління енергоспоживанням батарей у пристроях IoT через комплексну симуляцію в MATLAB. Запропонована концептуальна основа досягає значної економії енергії при покращенні рівнів продуктивності в різноманітних операційних сценаріях.

Результати симуляції вказують, що гібридна адаптивна оптимізація енергоспоживання може продовжити операційний термін служби пристроїв IoT на 36-47 % порівняно зі статичними підходами до управління живленням та на 8-11 % порівняно з базовим алгоритмом ОРЧ. Ці поліпшення досягаються при покращенні вимог до надійності зв'язку та цілісності даних завдяки інтелектуальному прогнозуванню.

Гібридна реалізація в MATLAB забезпечує міцну основу для подальших досліджень та розробок в оптимізації енергоспоживання IoT.

Модульна архітектура сприяє розширенню до додаткових алгоритмів оптимізації, методів машинного навчання та інтеграції з новими технологіями IoT.

Дослідження сприяє зростаючому корпусу знань, що розглядає виклики енергоефективності в системах IoT, та надає практичні висновки для впровадження інтелектуального управління живленням у розгортаннях реального світу.

Майбутня робота повинна зосередитися на валідації через тестування фізичних пристроїв, розробці федеративних підходів до навчання та дослідженні квантових методів оптимізації для наступного покоління систем IoT.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автори використовували Claude AI для перевірки на орфографію та правильність розставлення знаків пунктуації. Після використання цього сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Joshi, R. D., Banu, S., & Satyanarayana, B. (2025). Swarm intelligence-based energy optimization protocol for hybrid routing in wireless sensor networks. *Engineering, Technology & Applied Science Research, 15*(3), 23177-23182.

2. Sharmin, S., Ahmedy, I., & Md Noor, R. (2023). An energy-efficient data aggregation clustering algorithm for wireless sensor networks using hybrid PSO. *Energies, 16*(5), 2487. https://doi.org/10.3390/en16052487.

3. Lenin, K., Ravindhranath Reddy, C., & Siva Naga Raju, S. (2018). Hybridization of ant colony algorithm and particle swarm optimization algorithm for reduction of real power loss. *International Journal of Research–Granthaalayah, 6*(12), 120-128.

4. Zhang, Y., Yang, L., & Tan, Y. (2025). Energy-efficient adaptive routing in heterogeneous wireless sensor networks via hybrid PSO and dynamic clustering. *Journal of Cloud Computing*, *14*(1). https://doi.org/10.1186/s13677-025-00768-3.

References

1. Joshi, R. D., Banu, S., & Satyanarayana, B. (2025). Swarm intelligence-based energy optimization protocol for hybrid routing in wireless sensor networks. Engineering, Technology & Applied Science Research, 15(3), 23177-23182.

2. Sharmin, S., Ahmedy, I., & Md Noor, R. (2023). An energy-efficient data aggregation clustering algorithm for wireless sensor networks using hybrid PSO. Energies, 16(5), 2487. https://doi.org/10.3390/en16052487.

3. Lenin, K., Ravindhranath Reddy, C., & Siva Naga Raju, S. (2018). Hybridization of Ant Colony Algorithm and Particle Swarm Optimization Algorithm for Reduction of Real Power Loss. International Journal of Research–Granthaalayah, 6 (12), 120-128.

4. Zhang, Y., Yang, L. & Tan, Y. Energy-efficient adaptive routing in heterogeneous wireless sensor networks via hybrid PSO and dynamic clustering. *Journal of Cloud Computing*, *14*(1). https://doi.org/10.1186/s13677-025-00768-3.

Отримано 08.09.2025

UDC 004.02

Serhii Voloshchuk[1], Volodymyr Savinov[2]

[1]PhD Student, Department of Computer Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine)
E-mail: serhii.voloshchuk@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-3169-7316

[2]PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine)
E-mail: volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0862-5879

A SIMULATION STUDY OF HYBRID PARTICLE SWARM OPTIMIZATION AND ANT COLONY ALGORITHM IN MATLAB

The rapid expansion of the Internet of Things (IoT) has resulted in billions of battery-powered devices, making energy efficiency a critical factor for their usability. Ensuring long-term autonomous operation without reducing performance or communication reliability is a complex challenge, since most traditional optimization methods rely on static strategies and fail to address the dynamic nature of IoT environments. This leads to premature battery depletion and limits the scalability of IoT ecosystems.

The purpose of this article is to develop and simulate a hybrid algorithm that combines Particle Swarm Optimization (PSO) and Ant Colony Optimization (ACO) in MATLAB to improve the energy efficiency of IoT devices. A review of recent studies (Joshi et al., 2025; Sharmin et al., 2023; Lenin et al., 2018; Zhang et al., 2025) demonstrates that integrating metaheuristics can significantly enhance resource management in sensor networks. However, most research focuses on single techniques and does not fully explore the potential of hybrid approaches.

This study highlights unexplored aspects, including the synergy of PSO and ACO, the use of LSTM networks for predicting energy demand, and simulations accounting for battery degradation and temperature effects. The proposed algorithm optimizes critical parameters (transmission power, sleep cycles, sampling frequency), reducing average daily energy consumption by more than 40 % and extending device lifetime by up to 47 % compared to baseline methods.

The results confirm the effectiveness of hybrid algorithms in improving IoT device autonomy and provide a strong foundation for their practical application in real-world deployment scenarios.

Keywords: *Internet of Things; energy efficiency; optimization; Particle Swarm Optimization; Ant Colony Optimization; MATLAB.*

Fig.: 1. Tables: 7. References: 4.

Волощук С. І., Савінов В. Ю. Дослідження симуляції з використанням гібридного алгоритму оптимізації рою частинок та мурашиного алгоритму в MATLAB. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 176-184. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-176-184.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-185-192
УДК 004.85:004.77

Денис Сергійович Гончаров

аспірант кафедри комп'ютерної інженерії
Чорноморський національний університет імені Петра Могили (Миколаїв, Україна)
E-mail: honcharov.denys@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-1200-6677

ДІАГНОСТИКА РАКУ ГРУДЕЙ: IOT-СИСТЕМА З FPGA ТА WEKA-АНАЛІТИКОЮ

У сучасному світі все більше приділяється увага науковців аналізу раку молочної залози. У статті проводиться огляд алгоритмів стиснення зображень, отриманих з ПЛІС систем для подальшої роботи у застосунку WEKA. Запропоновано можливості для ранньої діагностики раку молочної залози. Системи, які поєднують інтернет речі (IoT), програмовані логічні схеми (ПЛІС) та програму для аналізу даних, дозволять проводити щоденний моніторинг стану здоров'я та діагностувати можливі захворювання на ранній стадії. Також описано, як стиснення медичних зображень впливає на точність їхнього аналізу.

***Ключові слова**: ПЛІС; WEKA; інформаційні технології; стиснення зображень; jpeg-ls.*
Рис.: 5. Табл.: 3. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. Рак молочної залози залишається найпоширенішим онкологічним захворюванням у жінок. Його рання діагностика дає можливість успішно діагностувати пухлини на ранній стадії їхнього утворення. Для підвищення ефективності цього процесу сучасна медицина потребує поєднання такої загальноприйнятої діагностики, як мамографія, з носимими пристроями для щоденного моніторингу стану здоров'я жінки. Тому сьогодні дуже важливо поєднувати нові технології, такі як спеціальні прискорювачі й розумні програми для аналізу даних, для створення безпечніших медичних рішень.

Постановка проблеми. Звичайні методи діагностики мають кілька недоліків. Наприклад, такий метод діагностики, як мамографія, зазвичай роблять лише раз на рік. Таким чином, залишається великий проміжок часу, під час якого рак може розвиватися непомітно. З іншого боку, сучасні системи, що використовують штучний інтелект, потребують великих обчислювальних потужностей. Якщо оптимізувати таку систему таким чином, щоб вона потребувала менших потужностей, це дозволить використання простих пристроїв для моніторингу за станом здоров'я у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження присвячені таким напрямкам, як інтернет речей (IoT), ПЛІС як прискорювач та використання WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) для аналізу даних.

У статті [1] автори досліджують виявлення раку молочної залози за допомогою термографічних зображень. Таким чином, вони описують популярний метод візуалізації діагностики раку молочної залози – мамографію, використання якого не дозволяє виявляти захворювання на ранній стадії. Автори пропонують використання інфрачервоної термографії як нову технологію для виявлення злоякісних захворювань на ранній стадії.

Автори статті [2] пропонують використовувати для постійного моніторингу здоров'я рішення на основі FPGA, а саме моделі Xilinx Spartan-7, яка за результатами їх дослідження продемонструвала високу енергоефективність, що дозволило подовжити час роботи системи та термін служби батареї, а також провели порівняння їх системи з аналогічними, але на базі мікроконтролерів. Таким чином, автори дійшли висновку про більшу ефективність та пропускну здатність системи, що досліджувалась.

Стаття [3] присвячена методам інтелектуального аналізу, які використовуються для аналізу даних, отриманих з носимих пристроїв. У ній описується використання академічного набору даних про рак молочної залози для проведення інтелектуального аналізу даних в застосунку WEKA. Крім того, у ній описується оптимізація даних за допомогою попередньої обробки та вилучення малозначущих ознак перед початком аналізу. Результати дослідження демонструють, що класифікатор лінивого IBK k-NN може досягти точності 98 %.

© Д. С. Гончаров, 2025

У статті [4] розглядаються труднощі аналізу медичних зображень, такі як: високі обчислювальні вимоги та затримка моделей глибокого навчання у медичній візуалізації. У своїй роботі автори представляють апаратний прискорювач FPGA з використанням системи на кристалі Zynq XC7Z020.

Стаття [5] описує апаратну реалізацію двох прискорювачів для двох альтернативних алгоритмів візуалізації, які автори отримали зі специфікації SystemC. Перший пов'язаний з комунікацією, і вимагає перекриття та конвеєрної обробки, а другий – з обчисленнями та використовує складні математичні функції.

У дослідженні [6] розроблено надійний метод класифікації раку молочної залози під назвою Shepherd на основі штучного інтелекту Crow. Для вибору найкращих маршрутів автори використовували безпечну обробку маршрутів з використанням FACS.

У статті [7] автори також використовували апаратний прискорювач FPGA на кристалі Zynq XC7Z020, як і автори статті [4], але використовували з процесором ARM Cortex-A9.

У статті [8] підсумовують результати розгортання моделі на різних обчислювальних пристроях із використанням глибокого навчання з FPGA. Автори включили у свою роботу оцінку продуктивності моделі, пропускну здатність та порівняння затримки з різними розмірами пакетів. У результаті дослідники дійшли висновку, що FPGA є найбільш придатним для використання як прискорювач глибокого навчання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Недослідженою частиною є створення системи, яка буде поєднувати різні технології. Таке поєднання дозволить зробити діагностику доступнішою, частішою, такою, яка б не потребувала великих обчислювальних потужностей.

Мета дослідження – створити ефективну, портативну систему для діагностики раку молочної залози, використовуючи поєднання ПЛІС, IoT та аналізу даних за допомогою програми WEKA.

Виклад основного матеріалу. Програмована логічна інтегральна схема – це пристрій, який можна налаштувати навіть після його виготовлення. Це робить його дуже гнучким і дозволяє швидко змінювати або оновлювати його функції.

У запропонованій системі передбачається робота зі значними об'ємами даних, тому використання ПЛІС є ідеальною базою для її створення, оскільки дозволяє паралельно виконувати декілька операцій та швидко обробляти великі обсяги даних. Крім того, значною перевагою є гнучкість параметрів, що дає можливість налаштувати ПЛІС для виконання конкретних задач.

Таким чином, запропонована система складається з кількох основних частин: блока збору даних від сенсорів, блоку попередньої обробки сигналів, модуля стиснення зображень, контролера інтерфейсів зв'язку та модуля передавання даних у застосунок WEKA. Для її реалізації використовується плата Xilinx Spartan-7 у середовищі Vivado Design Suite. Основна логіка описана мовою VHDL, а для взаємодії з сенсорами та передавання даних застосовано готові IP-ядра для UART та SPI. Сенсори з'єднані з ПЛІС через ці інтерфейси, а передача результатів здійснюється через модуль ESP8266. Модуль стиснення результатів реалізований за допомогою алгоритму JPEG-LS, який дозволяє зменшити обсяг медичних зображень без втрати важливих деталей.

Іншими словами, алгоритм роботи запропонованої системи працює таким чином. Коли пацієнт використовує систему, датчики збирають інформацію. Ця інформація спочатку надходить до ПЛІС, яка її обробляє. ПЛІС здатна виконувати багато операцій одночасно, що робить її ідеальною для швидкої обробки великих даних. Після цього дані відправляються до бази даних, а потім потрапляють у програму WEKA для подальшого аналізу (рис. 1).

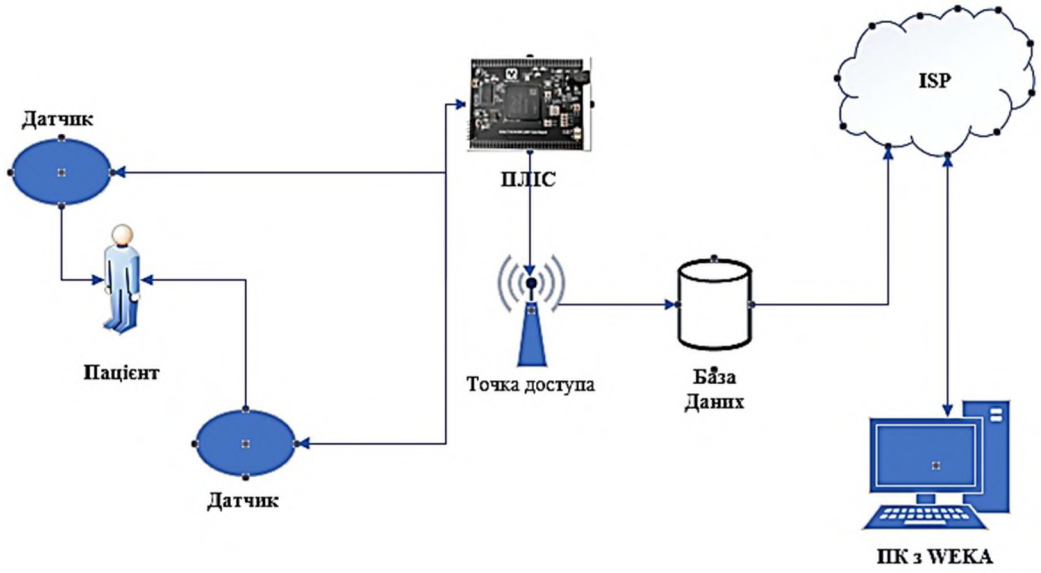


Рис. 1. Схема роботи ПЛІС системи

Джерело: розроблено автором.

Така структура робить систему швидкою, дає змогу обробляти дані паралельно й не перевантажує центральний процесор. Саме тому для цієї задачі доцільно застосовувати FPGA, а не звичайний мікроконтролер чи DPS-процесор.

Стиснення зображень раку молочної залози.

Існує безліч алгоритмів для стиснення зображень, таких як: jpeg, jpeg 2000, jpeg-ls, webp, deep learning lossy compression. Проте для медичних цілей краще застосовувати алгоритми, які стискають дані без втрат. Медичні зображення можуть містити дрібні структури, втрата яких може призвести до некоректного аналізу.

Таблиця 1 – Відомості про алгоритми стиснення

Алгоритм	Тип стиснення	Переваги	Недоліки	Використання в медицині
JPEG	З втратами	Простий, швидкий	Сильні артефакти під час високого стиснення, погана робота з деталями	Використовується нечасто через втрату дрібних деталей
JPEG 2000	Без втрат / з регульованими втратами	Висока якість, підтримка ROI, високий динамічний діапазон	Вища обчислювальна складність	Широко використовується DICOM, особливо для медичних зображень
JPEG-LS	Без втрат / майже без втрат	Висока швидкість, низька складність, добре стискає гладкі області	Менш ефективний для дуже текстурованих зображень	Використовується у медичній візуалізації
Deep Learning Lossy Compression	З адаптивними втратами	Адаптивне збереження важливих структур	Потребує великих наборів даних, складність реалізації, ще не є стандартом	Перспективний напрямок для збереження ключових деталей у зображеннях

Джерело: розроблено автором.

Для порівняння ефективності алгоритмів було взято зображення раку молочної залози, результати якої наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Стиснення зображення різними алгоритмами

Метод	Оригінал	Довжина рядка (біти)	Стиснення рядка	Довжина стисненого рядка (біти)	Коефіцієнт стиснення
JPEG	11001100 10101110 11001010 11001100 11001010 11001010 11001010 1100101	71	11001110 10101100 10101001 00110100 10100110 01101001 00101110	56	1,26
JPEG 2000		71	11100110 01011001 10100110 01100110 0100110110	42	1,69
JPEG-LS		71	10101100 10100110 01001101 00101001 1010	36	1,97
Deep Learning Lossy		71	10011010 00110010 11001100 11000100 1010	36	1,97

Джерело: розроблено автором.

Аналіз даних за допомогою WEKA.

Для експерименту в застосунку WEKA з відкритого доступу було взято набір даних, які містять різні фізіологічні показники та їхній зв’язок з наявністю або відсутністю раку молочної залози.

У першому експерименті для побудови моделі було застосовано RandomForest, який створює рішення на основі багатьох дерев, що забезпечує високу стійкість і точність. Аналіз проводився на наборі даних із 596 прикладів і 32 атрибутами з використанням десятикратної крос-валідації для підвищення надійності оцінки.

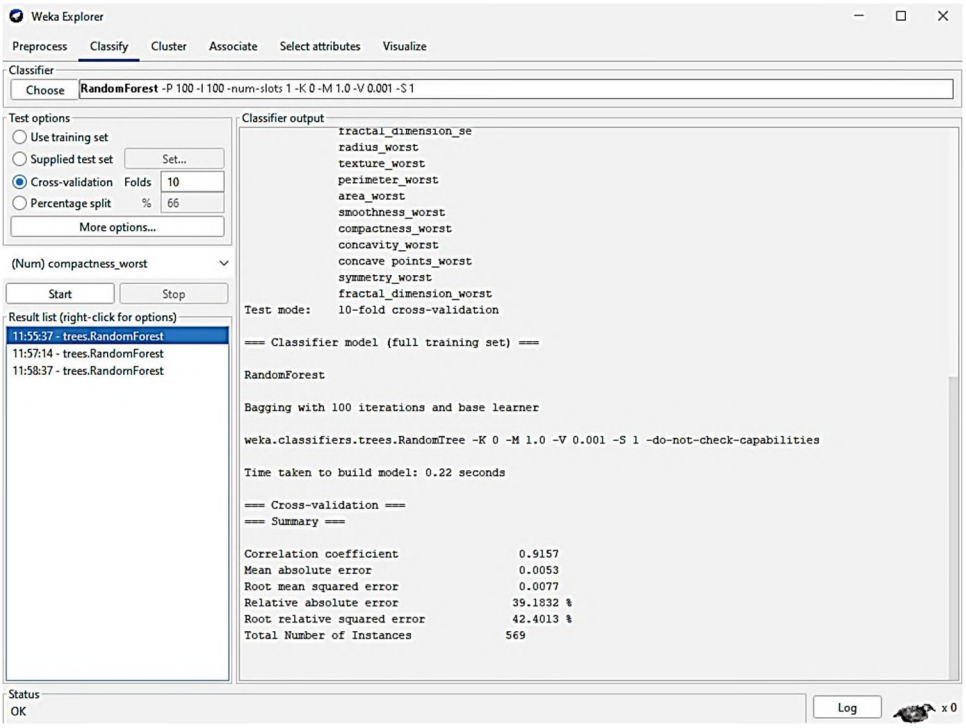


Рис. 2. Побудова моделі з 32 атрибутів

Джерело: розроблено автором.

Отримані результати свідчать про високу якість моделі. Коефіцієнт кореляції становить 0,9157, що вказує на сильний зв'язок між прогнозованими та фактичними значеннями. Середня абсолютна похибка дорівнює 0,0053, а корінь середньоквадратичної похибки – 0,0077, що демонструє низький рівень відхилення прогнозів від реальних даних. Відносні значення похибок 39,18 % і 42,40 % також підтверджують прийняту точність при роботі з багаторівневими медичними показниками (рис. 2).

У другому експерименті був використаний набір, що містив 569 прикладів та 31 атрибут (усі, крім ідентифікатора пацієнтів). Оцінювання також проводилося за допомогою десятикратної крос-валідації. Цього разу результати аналізу показали високу точність прогнозування. Коефіцієнт кореляції склав 0,9159, що вказує на дуже сильний зв'язок між фактичними та передбаченими значеннями. Середня абсолютна похибка дорівнює 0,0052, а корінь середньоквадратичної похибки 0,0076, що свідчить про мінімальне відхилення прогнозів від реальних даних. Відносні показники похибки також залишилися низькими 38,46 % і 42,20 %, що підтверджує стабільність роботи алгоритму (рис. 3).

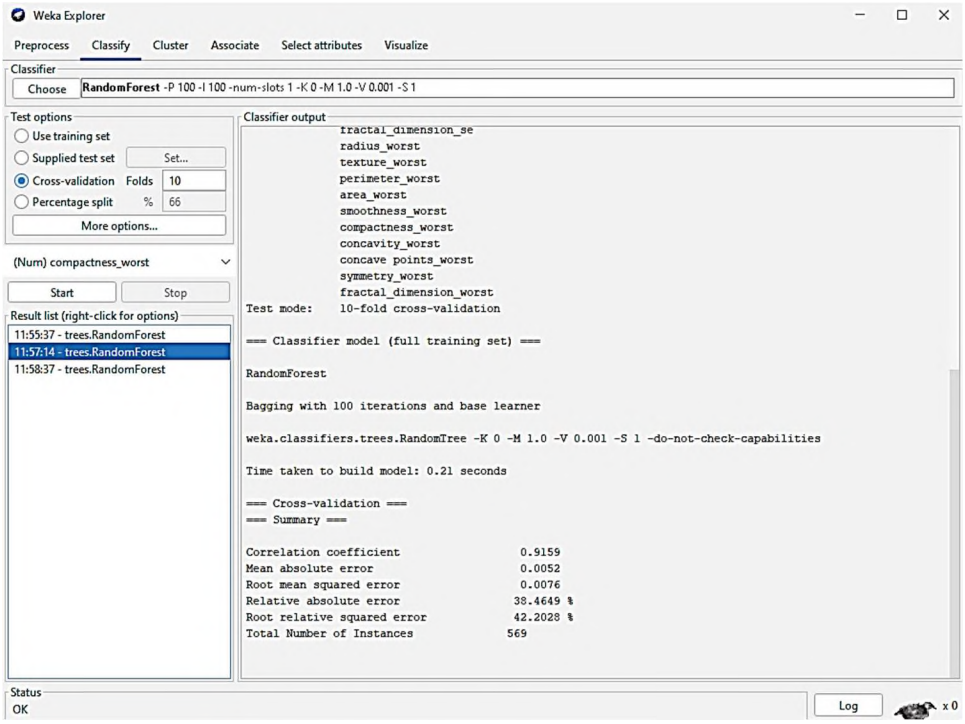


Рис. 3. Побудова моделі з 31 атрибута

Джерело: розроблено автором.

Під час виконання третього експерименту на початку роботи проведемо аналіз даних за допомогою методу CFsSubsetEval у поєднанні з пошуком Best First. Таким чином, було відібрано найбільш значущі атрибути з початкового набору, що складався з 32 показників і 596 прикладів. У результаті перевірки 295 можливих комбінацій ознак було визначено оптимальну підмножину з 6 атрибутів, яка надала високий рівень узгодженості з цільовою змінною показників придатності на рівні 0,846.

До відібраних характеристик увійшли: smoothness_ mean, fractal_ dimension_ mean, compactness_ se, fractal_ dimension_ se, smoothness_ worst та compactness_ worst (рис. 4).

Це свідчить про те, що саме параметри, пов'язані з гладкістю поверхні клітин, компактністю та фрактальними вимірами, мають найбільший вплив на визначення стану зразків.

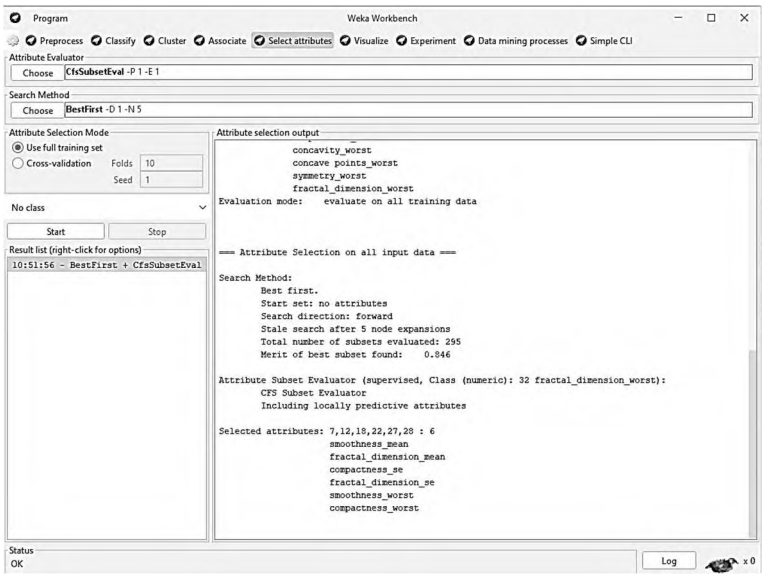


Рис. 4. Визначення оптимальної підмножини

Джерело: розроблено автором.

Ці результати показують, що навіть за умови зменшення кількості вхідних даних до невеликої підмножини можна зберегти високу точність аналізу.

У наступному експерименті для побудови моделі було застосовано RandomForest, проте зменшено кількість вхідних даних атрибутів. Замість 32 атрибутів залишено лише 6 найбільш значущих показників. Такий підхід дозволить перевірити, як відбір ознак вплинув на якість прогнозування.

Результати показали, що точність моделі знизилась порівняно з повним набором даних. Коефіцієнт кореляції становив 0,8141, що вказує на достатньо сильний, але вже слабший зв'язок між фактичними та прогнозованими значеннями. Середня абсолютна похибка зросла до 0,062, а корінь середньоквадратичної похибки до 0,0913, що відображає вищий рівень відхилень. Відносні показники похибки також зросли 51,63 і 57,90 %, що свідчить про втрату частини інформації при скороченні числа ознак (рис. 5).

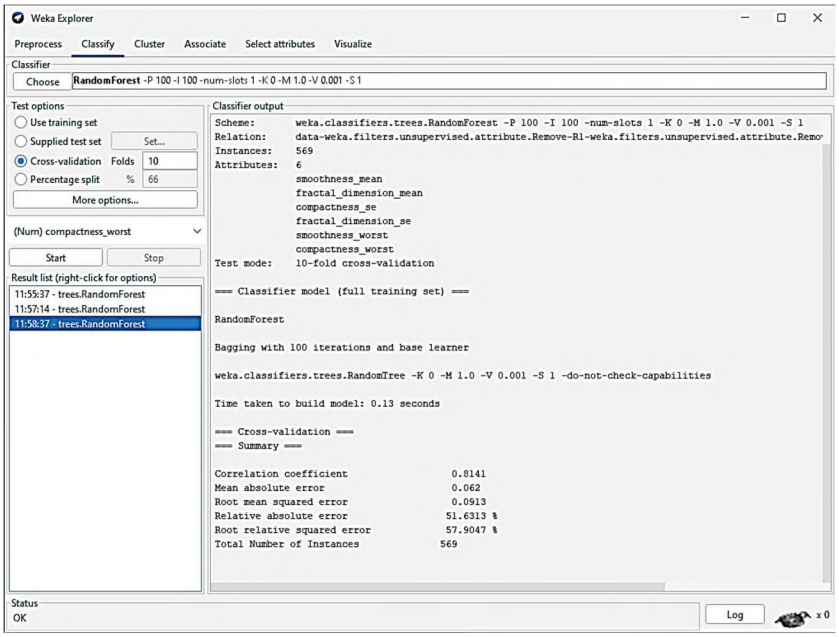


Рис. 5. Побудова моделі з шести атрибутів

Джерело: розроблено автором.

Аналіз трьох класифікацій повного набору даних та скорочених наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Аналіз успішності методів класифікацій

Варіанти моделей	Correlation coefficient	MAE	RMSE	RAE (%)	RRSE (%)
Усі 32 атрибути	0,9157	0,0053	0,0077	39,18	42,40
6 атрибутів з 32	0,8141	0,0620	0,0913	51,90	57,90
31 атрибут (без ID)	0,9159	0,0052	0,0076	38,46	42,20

Джерело: розроблено автором.

Висновки. Запропоноване поєднання технологій ПЛІС, IoT та аналізу за допомогою застосунку WEKA має великий потенціал. Такий підхід допоможе поліпшити своєчасне діагностування раку молочної залози на ранній стадії. У ході дослідження було зроблено порівняння чотирьох алгоритмів для стиснення медичних даних, а саме зображень раку молочної залози. Порівняння одного зображення дозволило виявити, що алгоритми JPEG-LS та Deep Learning Lossy продемонстрували однакові результати, коефіцієнт стиснення 1,97. Попри те, що два алгоритми продемонстрували однакові результати, Deep Learning Lossy не є стандартом DICON. Незважаючи на це, алгоритм Deep Learning Lossy має великий потенціал у застосуванні для медичних даних.

Проведена кластеризація за допомогою застосунку WEKA. Для кластеризації та відбору ключових ознак було взято набір даних, який містить 569 прикладів та 32 атрибути. Було виконано три кластеризації: повного набору даних, набору даних із видаленим ідентифікатором пацієнта та набором, який складається з тих атрибутів, які було відібрано за допомогою CFsSubsetEval у поєднанні з пошуком Best First з початкового набору. Можна зробити висновок, що хоча кластеризація відібраних ознак показала непоганий результат, все одно він вимагає доопрацювання у подальшій праці. Класифікація, яка містила 31 атрибут, продемонструвала коефіцієнт кореляції 0,9159, що є добрим результатом. Також було підтверджено, що атрибут з назвою «ідентифікатор пацієнта» не несе в собі корисної інформації для аналізу.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автор використовував ChatGPT для упорядкування думок стосовно постановки проблеми. Після використання цього інструменту/сервісу автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Gayathri, R., Vijaya Madhari, M., & Christy Bobby, T. (2015). FPGA based diagnosis and classification of breast disease using thermographic images. *International Journal of Scientific Research and Management*, *3*(6), 3139-3142.

2. Vaithianathan, Muthukumaran & Udkar, Shiv & Reddy, Manjunath & Roy, Deepanjan & Rajasekaran, Senkadir. (2024). FPGA-Based Smart Health Monitoring Systems for Wearable Devices. *International Journal of intelligent systems and applications in engineering.* https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33185.62567.

3. Alshammari, M., & Mezher, M. (2020). A Comparative Analysis of Data Mining Techniques on Breast Cancer Diagnosis Data using WEKA Toolbox. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *11*(8). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2020.0110829.

4. Mhaouch, A., Gtifa, W., & Machhout, M. (2025a). FPGA Hardware Acceleration of AI Models for Real-Time Breast Cancer Classification. *AI*, *6*(4), 76. https://doi.org/10.3390/ai6040076.

5. Pagliari, D. J., Casu, M. R., & Carloni, L. P. (2017). Accelerators for Breast Cancer Detection. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, *16*(3), 1-25. https://doi.org/10.1145/2983630.

6. Majji, R., G., O. P. P., Rajeswari, R., & R., C. (2023). Smart IoT in Breast Cancer Detection Using Optimal Deep Learning. *Journal of Digital Imaging*. https://doi.org/10.1007/s10278-023-00834-9.

7. Mhaouch, A., Gtifa, W., & Machhout, M. (2025). FPGA Hardware Acceleration of AI Models for Real-Time Breast Cancer Classification. *AI*, *6*(4), 76. https://doi.org/10.3390/ai6040076.

8. Wong, E.-H., Zakaria, F. F., Mustapa, M., Warip, M. N. M., & Ehkan, P. (2023). Breast cancer classification using deep learning and FPGA inferencing. In *International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE 2021)*. AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0111204.

References

1. Gayathri, R., Vijaya Madhari, M., & Christy Bobby, T. (2015). FPGA based diagnosis and classification of breast disease using thermographic images. *International Journal of Scientific Research and Management*, *3*(6), 3139-3142.

2. Vaithianathan, Muthukumaran & Udkar, Shiv & Reddy, Manjunath & Roy, Deepanjan & Rajasekaran, Senkadir. (2024). FPGA-Based Smart Health Monitoring Systems for Wearable Devices. *International Journal of intelligent systems and applications in engineering.* https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33185.62567.

3. Alshammari, M., & Mezher, M. (2020). A Comparative Analysis of Data Mining Techniques on Breast Cancer Diagnosis Data using WEKA Toolbox. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *11*(8). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2020.0110829.

4. Mhaouch, A., Gtifa, W., & Machhout, M. (2025a). FPGA Hardware Acceleration of AI Models for Real-Time Breast Cancer Classification. *AI*, *6*(4), 76. https://doi.org/10.3390/ai6040076.

5. Pagliari, D. J., Casu, M. R., & Carloni, L. P. (2017). Accelerators for Breast Cancer Detection. *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, *16*(3), 1-25. https://doi.org/10.1145/2983630.

6. Majji, R., G., O. P. P., Rajeswari, R., & R., C. (2023). Smart IoT in Breast Cancer Detection Using Optimal Deep Learning. *Journal of Digital Imaging*. https://doi.org/10.1007/s10278-023-00834-9.

7. Mhaouch, A., Gtifa, W., & Machhout, M. (2025). FPGA Hardware Acceleration of AI Models for Real-Time Breast Cancer Classification. *AI*, *6*(4), 76. https://doi.org/10.3390/ai6040076.

8. Wong, E.-H., Zakaria, F. F., Mustapa, M., Warip, M. N. M., & Ehkan, P. (2023). Breast cancer classification using deep learning and FPGA inferencing. In *International Conference on Biomedical Engineering (ICoBE 2021)*. AIP Publishing. https://doi.org/10.1063/5.0111204.

Отримано 19.09.2025

UDC 004.85:004.77

Honcharov Denys
Phd Student, Department of Computer Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University (Mykolaiv, Ukraine)
E-mail: honcharov.denys@chmnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-1200-6677

BREAST CANCER DIAGNOSTICS: IOT SYSTEM WITH FPGA AND WEKA ANALYTICS

Breast cancer remains one of the most common diseases among women. Timely diagnosis will help reduce mortality rates and reduce treatment costs, as the longer the disease remains undiagnosed, the cost of treatment increases more. The article proposes an approach to creating a portable device based on the FPGA system. This device can be used at home, without the need to make an appointment with a doctor once more. A comparative analysis of four image compression algorithms was made. When compressing the same image with different algorithms, the best result was achieved using JPEG-LS and Deep Learning Lossy. Compression coefficient scores were 1,97. It should be noted that compression algorithms with large losses will not give the desired result, since there is a chance to lose an important part of the image for a correct diagnosis. The WEKA application was used for data analysis. The first study was conducted on a complete data set of 596 examples and 32 attributes. The analysis was carried out using the RandomForest algorithm with tenfold validation. The results demonstrated high efficiency: the correlation coefficient was 0,9157, the mean absolute error – 0,0053, and the root of the mean square error – 0,0077. The second experiment consisted of 596 instances and 31 attributes (without patient ID). The result obtained was more accurate. The correlation coefficient is 0,9159, the mean absolute error is – 0,0052, and the root of the mean square error is – 0,0076. The third experiment differed from the previous ones. Before starting clustering, a search was performed for the attributes that have the greatest value. Using the CFsSubsetEval method in combination with the BestFirst search, 6 attributes were selected from the initial dataset. These indicators included indicators: smoothness_ mean, fractal_ dimension_ mean, compactness_ se, fractal_ dimension_ se, smoothness_ worst and compactness_ worst. As a result of using a set of 6 attributes, the accuracy of the model decreased, but still remained high enough, which indicates the possibility of maintaining the accuracy at a sufficient level even with a reduced amount of input data.

Keywords: *FPGA; WEKA; information technology; image compression; jpeg-ls.*
Fig.: 5. Table: 3. References: 8.

Гончаров Д. С. Діагностика раку грудей: IOT-система з FPGA та WEKA-аналітикою. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 185-192. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-185-192.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-193-202
УДК 004.056.55:378

***Мирослав Валерійович Лахно*[1]**

[1]аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)
E-mail: valss725@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6979-6076. **ResearcherID:** KFO-8669-2024

МЕТОД БАГАТОРІВНЕВОГО АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ СЛІДІВ В ІНФОРМАЦІЙНО-ОСВІТНІХ СИСТЕМАХ

Запропоновано багаторівневий метод аналізу цифрових слідів користувачів інформаційно-освітніх систем з метою збільшення рівня інформаційної безпеки. Метод поєднує кластеризацію поведінкових профілів користувачів, баєсівське ймовірнісне моделювання та алгоритм машинного навчання XGBoost з акцентом на експоненціальне зважування якості кластеризації. Реалізована на Python система забезпечує виявлення ризиків та підтримку прийняття рішень щодо безпечного доступу до ресурсів інформаційно-освітніх систем закладів вищої освіти.

Ключові слова: *цифрові сліди; інформаційна безпека; інформаційно-освітня система; метод; кластеризація; XGBoost; баєсівська мережа; ризик.*

Рис.: 3. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Інформаційно-освітні системи (ІОС) закладів вищої освіти (ЗВО) все частіше стають об'єктом кібернетичних атак через зростання обсягів особистих даних, цифрових ресурсів та інтенсивності взаємодії користувачів у віртуальному середовищі [1]. Ось чому головним завданням залишилося своєчасне виявлення загроз інформаційній безпеці (ІБ), які маскують під типову активність здобувачів вищої освіти (ЗдВО), викладачів та адміністративного персоналу ЗВО. Наявні методи аналізу поведінки користувачів [2] не беруть повністю до уваги гетерогенність цифрових слідів (ЦС) та контекстуальні фактори взаємодії з ІОС ЗВО. Це не дозволяє швидко адаптуватися до змін поведінкових шаблонів користувачів ІОС. Специфікою ІОС ЗВО є значна різноманітність ролей користувачів. Це ЗдВО, викладачі, адміністративний персонал, служби ЗВО тощо. Це зумовлює специфіку ЦС та підвищує ризики порушень ІБ. У більшості наявних робіт ЦС аналізуються переважно для освітньо-педагогічної постановки завдань. Зокрема, це ідентифікація стилів навчання, прогнозування успішності тощо. Тоді як проблематика інформаційних ризиків, пов'язаних із виявленням атипових поведінкових шаблонів, досі недостатньо опрацьована. Саме тому запропонований метод сфокусовано на оцінюванні рівня інформаційних ризиків, враховуючи специфіку ІОС ЗВО. У зв'язку з цим виникає нагальна потреба у створенні нових моделей та методів аналізу ЦС, здатних інтегрувати кластерний аналіз, ймовірнісне моделювання та прогнозування рівня ризиків ІБ у єдину систему підтримки прийняття рішень у сфері ІБ ЗВО.

Постановка проблеми. Гарантування інформаційної безпеки в ІОС ЗВО потребує нових підходів до спостереження за поведінкою користувачів на основі ЦС. Наявні рішення зазвичай реалізують окремі складники поведінкового аналізу. Також не враховують якість кластеризації, ймовірнісний характер взаємозв'язків між діями користувачів та подіями ІБ, а також мінливість рівня ризиків у часі. Такий підхід зменшує точність оцінки безпекових інцидентів і ускладнює адаптацію до нових сценаріїв загроз ІБ. Через це постає проблема розробки нового методу аналізу ЦС, який дозволить врахувати поведінкові відхилення, динаміку рівня ризиків та забезпечувати підтримку ухвалення рішень з ІБ ІОС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав зростання зацікавленості до вивчення цифрових слідів (ЦС), зокрема у ЗВО. Так, M. Camacho у [3] дослідив роль ЦС у формуванні цифрової ідентичності здобувачів вищої освіти (ЗдВО). У [4] S. Karabatak проаналізував риси дій поведінки молоді у цифровому середовищі. У [5] M. Buitrago-Ropero систематизував дослідження щодо використання ЦС в освіті. H. Kumar у [6] дослідив рівень обізнаності ЗдВО щодо наслідків цифрової активності та виокремив проблему недостатньої підготовки до управління цифровою ідентичністю. У [7] A. Nugumanova дослідив математичні методи для виявлення

© М. В. Лахно, 2025

поведінкових шаблонів на основі ЦС на освітніх платформах та у соціальних мережах. У [8] C. Olipas оцінив рівень цифрової грамотності ЗдВО на основі аналізу ЦС. A. Songsom [9] запропонував модель управління освітніми відносинами на основі ЦС та Інтернету речей. У [10] M. Ollagnier-Beldame вивчав методи застосування ЦС для раннього виявлення ризику неуспішності на курсах програмування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри активне вивчення ЦС, більша частка розглянутих досліджень зосереджена на педагогічних аспектах, таких як формування цифрової ідентичності, прогнозування успішності або персоналізація навчання. При цьому недостатньо уваги приділено проблематиці інформаційної безпеки, зокрема виявленню загроз, що ґрунтується на комплексному аналізі поведінкових шаблонів дій користувачів інформаційно-освітніх платформ. Також відсутні узагальнені методи для багаторівневого аналізу цифрових слідів, які б поєднували кластеризацію, ймовірнісне моделювання та машинне навчання з урахуванням якісних характеристик опрацювання даних. До того ж не розроблено методів, що враховують зміни рівня ризику для оцінювання поведінкової мінливості користувачів у середовищі освітніх платформ. Залишилось відкритим питання інтеграції локальних моделей виявлення атипової поведінки із глобальною оцінкою рівня ризику для інформаційно-освітньої системи закладу вищої освіти.

Метою статті є розробка методу багаторівневого аналізу цифрових слідів в інформаційно-освітніх системах, який забезпечить виявлення атипової поведінки користувачів, оцінювання рівня інформаційних ризиків та підтримку ухвалення рішень щодо безпечного доступу до цифрових ресурсів закладу вищої освіти.

Виклад основного матеріалу. Основна ідея методу полягає в побудові ансамблю кластеризацій ЦС, результати якого зважуються за якістю за допомогою експоненціальної функції. Це дало змогу взяти до уваги гетерогенність поведінки користувачів у ІОС та підвищити релевантність групування даних. На базі кластеризованих підмножин ЦС формуємо локальні баєсівські мережі (БМ або BN). Ці баєсівські мережі відображають причинно-імовірнісні залежності між поведінковими параметрами. процесі дослідження це дозволило провести оцінку ймовірності виникнення інцидентів ІБ. Додатково використано алгоритм машинного навчання (ML) XGBoost для передбачення рівня ризику ІБ для ІОС. Інтегрована оцінка рівня ризику обчислена як зважене поєднання наслідків ймовірнісного моделювання та ML-прогнозування.

Формалізуємо метод. Нехай $D=\left\{x^{(1)},x^{(2)},...,x^{(N)}\right\}$, $x^{(i)}\in R^d$, множина ЦС, користувачів ІОС. Кожен вектор $x^{(i)}=\left(x_1^{(i)},x_2^{(i)},...,x_d^{(i)}\right)$ описує поведінкові характеристики сеансу користувача. Запроваджено ансамбль кластеризаторів $C=\left\{C^1,C^2,...,C^m\right\}$, кожен з яких формує кластеризацію $C^{(j)}:D\to\left\{1,...,K_j\right\}$. Якість кожного кластеризатора оцінюємо метрикою $Q^{(j)}>0.$ Ваги визначаємо експоненційно

$$\omega^{(j)}=\frac{e^{\beta\cdot Q^{(j)}}}{\sum_{t=1}^{m}e^{\beta\cdot Q^{(t)}}}, \tag{1}$$

де $\omega^{(j)}$ – вага j -го алгоритму кластеризації;

$\beta>0$ – гіперпараметр чутливості до різниці в якості кластерного аналізу (КА) $Q^{(j)}$. Тобто чим вища якість кластеризації $Q^{(j)}$, тим експоненційно більший її внесок у консенсус.

Вага $\omega^{(j)}$ кожного алгоритму кластеризації відображала його відносний внесок у підсумкове групування даних. Це означає, що алгоритм, який забезпечує вищу якість кластеризації за обраною метрикою, отримує експоненційно більший вплив на формування консенсусного рішення. У ролі метрики можна використати силуетний коефіцієнт або Davies-

Bouldin Index. Отже, ансамбль кластеризацій забезпечує гнучкий вибір алгоритмів і їх комбінацій. При цьому зберігає баланс між різними підходами до структурування даних.

Далі формуємо матрицю спільного членства:

$$M_{i,j} = \frac{1}{m}\sum_{t=1}^{m} \mathbb{I}\left[C^{(t)}\left(x^{(i)}\right) = C^{(t)}\left(x^{(j)}\right)\right], \tag{2}$$

де $\mathbb{I}[\cdot]$ – індикаторна функція.

Для кожного кластера $C_k \subset D$ будуємо БМ:

$$B_k = \left(G_k, \theta_k\right), \tag{3}$$

де $G_k = \left(V_k, E_k\right)$ – орієнтований ациклічний граф між змінними (ознаками) $x_1, ..., x_d$;

V_k – множина вузлів (поведінкових ознак користувачів);

E_k – множина дуг (залежностей);

$\theta_k = \{P(X_i | Pa(X_i))\}_{X_i \in V_i}$ – набір умовних ймовірнісних розподілів, визначених для кожної змінної X_i з множиною батьківських змінних $Pa\left(X_i\right) \subseteq V_k$.

Ймовірність ЦС у межах кластера визначено так:

$$P\left(x \middle| B_k\right) = \prod_{i=1}^{d} P\left(x_i \middle| Pa\left(x_i\right)\right). \tag{4}$$

Прогнозування рівня ризику здійснено за допомогою ML. Для всіх векторів $x \in D$ побудовано модель машинного навчання:

$$\hat{R}\left(x\right) = f_{ML}\left(x\right), \tag{5}$$

де f_{ML} – XGBoost ансамбль дерев.

Далі обчислюємо зважену оцінку рівня ризику ІБ ІОС з урахуванням БМ та ML-прогнозу:

$$R\left(x\right) = \lambda \cdot P\left(x \middle| B_k\right) + \left(1-\lambda\right) \cdot \hat{R}\left(x\right), \quad \lambda \in \left[0,1\right], \tag{6}$$

де $R\left(x\right) \in \left[0,1\right]$ – інтегрована оцінка рівня ризику дії користувача;

$\lambda \in \left[0,1\right]$ – ваговий коефіцієнт для збалансування обох компонент;

$P\left(x | B_k\right)$ – апостеріорна ймовірність поведінки згідно з кластерною баєсівською моделлю;

$\hat{R}\left(x\right)$ – прогнозоване значення рівня ризику за допомогою ML-моделі.

Отже, формулу (6) реалізовано у вигляді об’єднання прогнозу. Прогноз отримано за допомогою БМ та оцінки ризику з моделі XGBoost. Псевдокод, який ми наведемо далі (після рис. 1, див. рядки 13–16), деталізує цей процес.

На основі інтегрованої оцінки застосовуємо логіку доступу:

$$\delta\left(x_t\right) = \begin{cases} \text{"}дозволити\ доступ\text{"}, якщо\ R\left(x\right) < r_1; \\ \text{"}запит\ підтвердження\text{"}, якщо\ r_1 \le R\left(x\right) < r_2; \\ \text{"}заблокувати\ доступ\text{"}, якщо\ R\left(x\right) \ge r_2, \end{cases} \tag{7}$$

де r_1, r_2 – порогові значення для рівнів ризику (визначалися емпірично).

Узагальнену блок-схему роботи методу аналізу ЦС подано на рис. 1.

Через багаторівневу структуру та наявність декількох складників із незалежною логікою (кластеризація, БМ, XGBoost, контекстуальні профілі) формальне представлення методу у вигляді псевдокоду зафіксує логіку переходів між рівнями аналізу та відображенням результатів у кінцеву дію системи підтримки рішення.

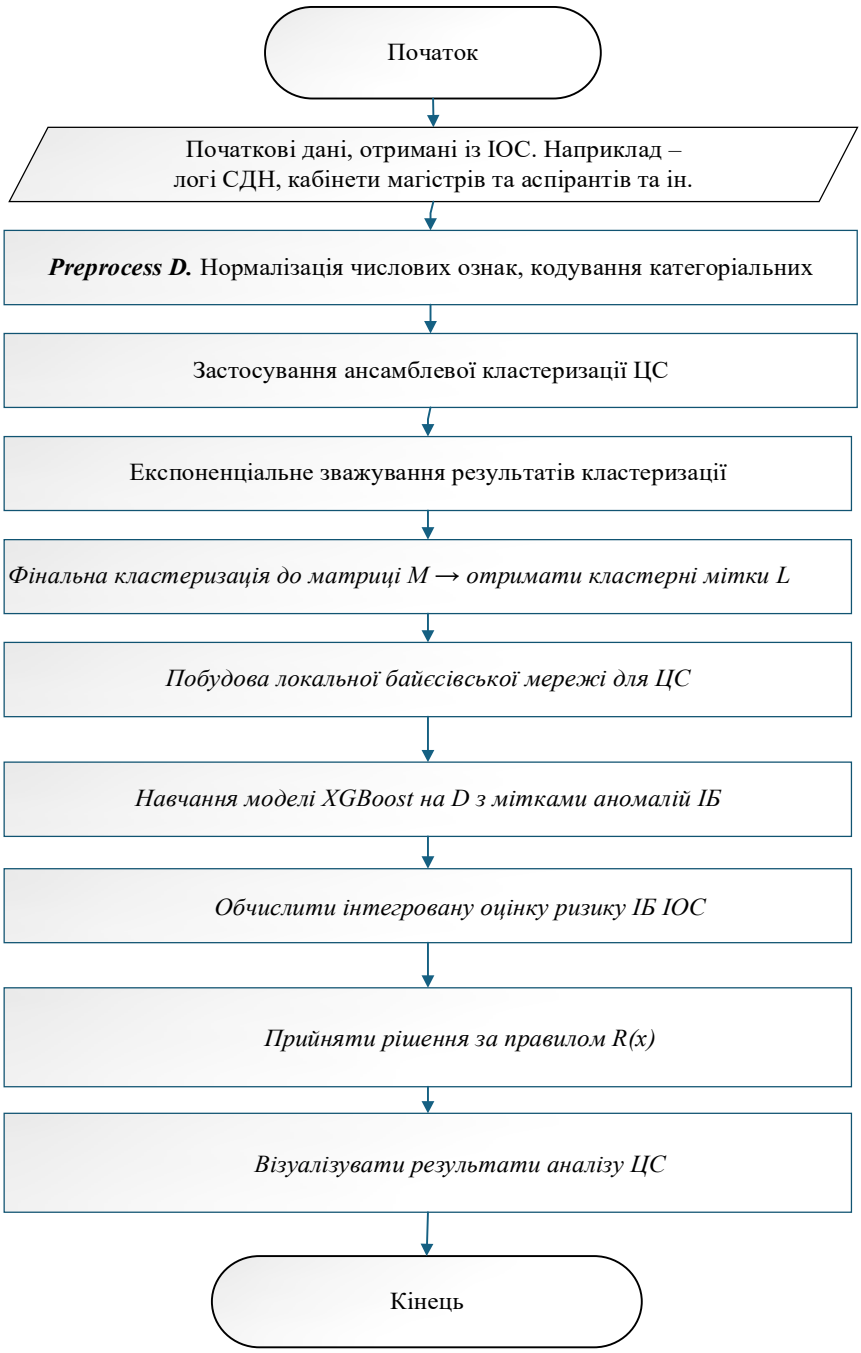


Рис. 1. Блок-схема методу аналізу ЦС

Джерело: розроблено автором.

Вхід:

X – множина ЦС користувачів ІОС ЗВО;
UP – профілі користувачів;
AR – база правил інцидентів;
T – часове вікно спостереження;

Вихід:
R – інтегрована оцінка рівня ризику користувача;*
D – множина прийнятих рішень (D ⊂ {Allow, Alert, Block});
01: ***Begin***
02: Perform preprocessing and normalization of digital traces in X;
03: Apply ensemble clustering to X to obtain clusters C = {C₁, C₂, ..., C_k};
04: ***For*** *each cluster C_i in C* ***do***
05: Construct a local Bayesian network B_i from samples in C_i;
06: ***For*** *each user x ∈ C_i* ***do***
07: Compute posterior probability P(x | B_i) using inference;
08: Evaluate risk score $R_\beta(x) = f(P(x \mid B_i))$;
09: ***End for***
10: ***End for***
11: Train XGBoost model F_XGB on labeled digital traces;
12: ***For*** *each user x ∈ X* ***do***
13: Predict refined risk score R_xgb(x) = F_XGB(z_x);
14: Obtain contextual profile CON(x) from UP;
15: Compute contextual risk adjustment $R_ctx(x) = \alpha \cdot R_\beta(x) + (1-\alpha) \cdot \bar{R}(CON(x))$;
16: Integrate final risk $R^*(x) = \gamma \cdot R_xgb(x) + (1-\gamma) \cdot R_ctx(x)$;
17: ***If*** *R*(x) > threshold r_1* ***then***
18: Retrieve AR(x) from AR if exists matching rule;*
19: Make decision D(x) ∈ {Alert, Block} based on R and AR*(x);*
20: ***Else***
21: D(x) ← Allow;
22: ***End if***
23: ***End for***
24: ***End***

Псевдокод втілює багаторівневе опрацювання ЦС, яке починається з їх попередньої обробки шляхом нормалізації, фільтрації та векторизації ознак дій користувачів. Далі застосовується ансамбль кластеризації (K-Means, DBSCAN тощо). А результати агрегуються з урахуванням ваг, визначених за якістю кластеризації. Для кожного кластеру формуємо локальну баєсівську мережу (БМ). Вона дає змогу оцінити апостеріорну ймовірність рівні ризику ІБ для ІОС. Паралельно виконуємо навчання моделі XGBoost на розмічених даних. Далі надходять з навчальних платформ ЗВО або системи моніторингу подій ІБ. Отриманий прогноз уточнювався з урахуванням групової поведінки користувача. Фінальну інтегровану оцінку ризику формуємо як поєднання індивідуального прогнозу та контекстних характеристик дій користувача в ІОС. Рішення про подальші дії ухвалюємо на основі порогових значень рівня ризику та експертних правил, які зберігаються в базі знань системи підтримки прийняття рішень.

Урахування гетерогенності поведінки користувачів досягнуто завдяки використанню ансамблю кластеризацій, що включав алгоритми K-Means, DBSCAN та агломеративну кластеризацію. Вибір цих методів обґрунтований різною чутливістю до параметрів і здатністю виявляти як компактні (K-Means), так і довільної форми кластери (DBSCAN), а також ієрархічні структури (агломеративний підхід). Для оцінки якості кластеризації використовувалися метрики силуетного коефіцієнта та індексу Davies-Bouldin. Це дозволило встановити релевантність виділених груп. Метод аналізу ЦС реалізовано на мові програмування Python (v3.10).

Для експериментальних досліджень використовувалися дані, отримані з системи дистанційного навчання (Moodle) Національного університету біоресурсів і природокористування України. У табл. 1 висвітлено набір полів, кожне з яких відображає ознаки поведінкового профілю користувача на платформі https://elearn.nubip.edu.ua/. Числові атрибути відображали тривалість сесії (що моделює експоненціальний розподіл) та кількість виконаних дій (узгоджено з розподілом Пуассона). Це дозволило під час настових досліджень програмного продукту, створеного на основі методу аналізу ЦС, сформувати кількісну оцінку інтенсивності взаємодії з платформою Moodle.

Категоріальні характеристики містять тип пристрою, за рахунок якого відбувається взаємодія, час доби, а також роль користувача в освітньому середовищі. Ці дані сформували контекстуальне тло цифрової поведінки користувачів в ІОС ЗВО (на прикладі НУБІП України).

Таблиця 1 містить також бінарні індикатори – ознаки змін IP-адреси та географічної локації користувачів, або зміни контексту дій користувача на https://elearn.nubip.edu.ua/. Для тестового набору додано поле anomaly_label, яке відображало вручну або автоматично призначену анотацію. Це поле відображало, чи містила така сесія ознаки загрози ІБ (тобто рівень ризику) або відхилення від очікуваної поведінки. На рис. 1 представлено результат візуалізації кластерів ЦС користувачів ІОС https://elearn.nubip.edu.ua/, отриманих внаслідок застосування ансамблевої кластеризації та подальшого зменшення розмірності методом t-SNE. Кожна точка на площині (рис. 1) – це окремий сеанс користувача ІОС. Сеанс, відповідно, описано низкою поведінкових характеристик, попередньо нормалізованих та закодованих.

Різні кольори на рис. 1 вказували належність до відповідного кластеру. Кластер сформовано за допомогою поєднання результатів функціонування алгоритмів KMeans, DBSCAN і агломеративної кластеризації з використанням експоненційного зважування за метрикою якості. Просторове розташування кластерів на площині свідчить про наявність структурованих груп поведінки користувачів, які відрізнялися від типових ЦС. Видима відокремленість окремих скупчень вказує на ефективність методу для виявлення атипових шаблонів поведінки за допомогою аналізу ЦС.

Подібна структура тестового датасету дозволила інтегрувати часові, просторові, контекстуальні й поведінкові риси ЦС кожного користувача ресурсу Moodle.

Таблиця 1 – Структура тестового набору даних для дослідження моделі аналізу ЦС

Поле	Опис
session_duration	Тривалість сесії (у хвилинах. Для тесту взято з експоненційного розподілу)
num_actions	Кількість дій за сесію (пуассонівський розподіл)
device_type	Тип пристрою, за рахунок якого відбулася взаємодія (desktop / laptop / mobile / tablet)
time_of_day	Час доби (morning / afternoon / evening / night)
ip_change	Факт зміни IP (0/1)
geo_shift	Геолокаційне переміщення (0/1)
user_role	Роль користувача (student / teacher / admin)
anomaly_label	Ознака аномалії (0 = норма, 1 = загроза)

Результати дослідження наведено на рис. 2 та 3.

На рис. 3 представлено розподіл інтегрованої оцінки рівня ризику для сесій користувачів ІОС. Для кожної сесії поєднано прогноз ризику за моделлю XGBoost із апостеріорною ймовірністю з локальної БМ, отриманої після кластеризації ЦС. Розподіл дозволив візуалізувати частку сеансів з низьким, середнім та високим рівнем ризику. Отриманий результат підтвердив ефективність виявлення атипової поведінки користувачів.

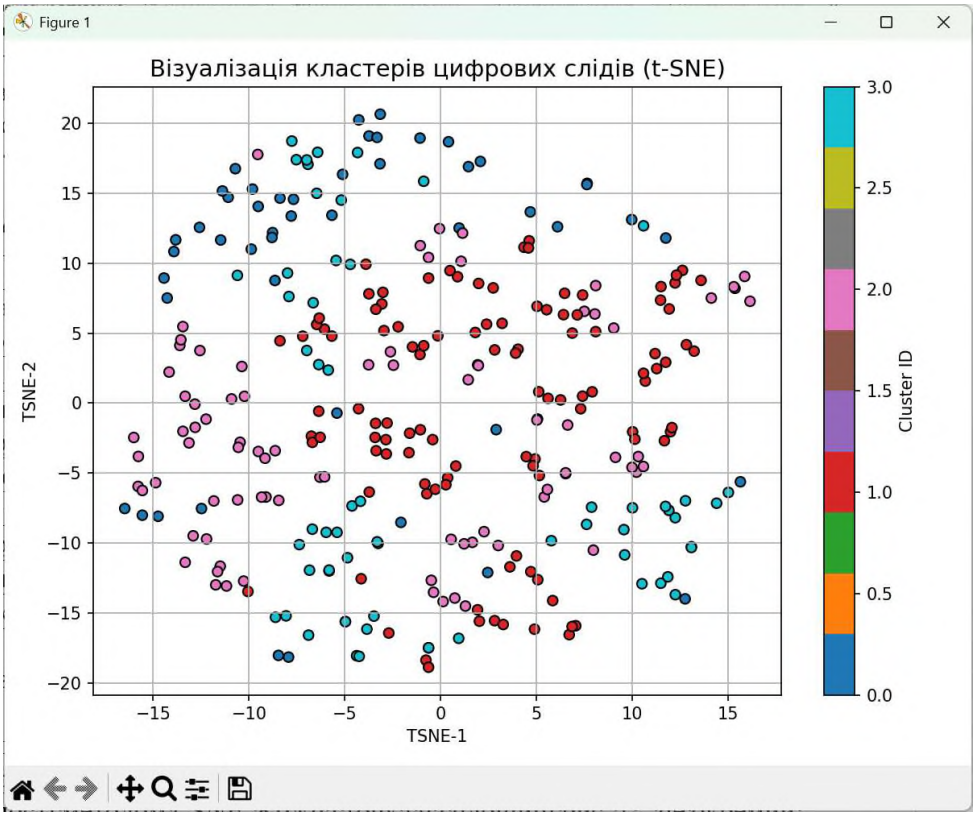


Рис. 2. Результат візуалізації кластерів ЦС користувачів ІОС

Як продемонстрував аналіз попередніх досліджень, більшість наявних підходів реалізують компоненти поведінкового аналізу окремо (табл. 2). Тобто не враховують взаємозв'язки між якістю кластеризації, достовірністю ймовірнісних висновків і продуктивністю прогнозних моделей дій користувачів ОІС.

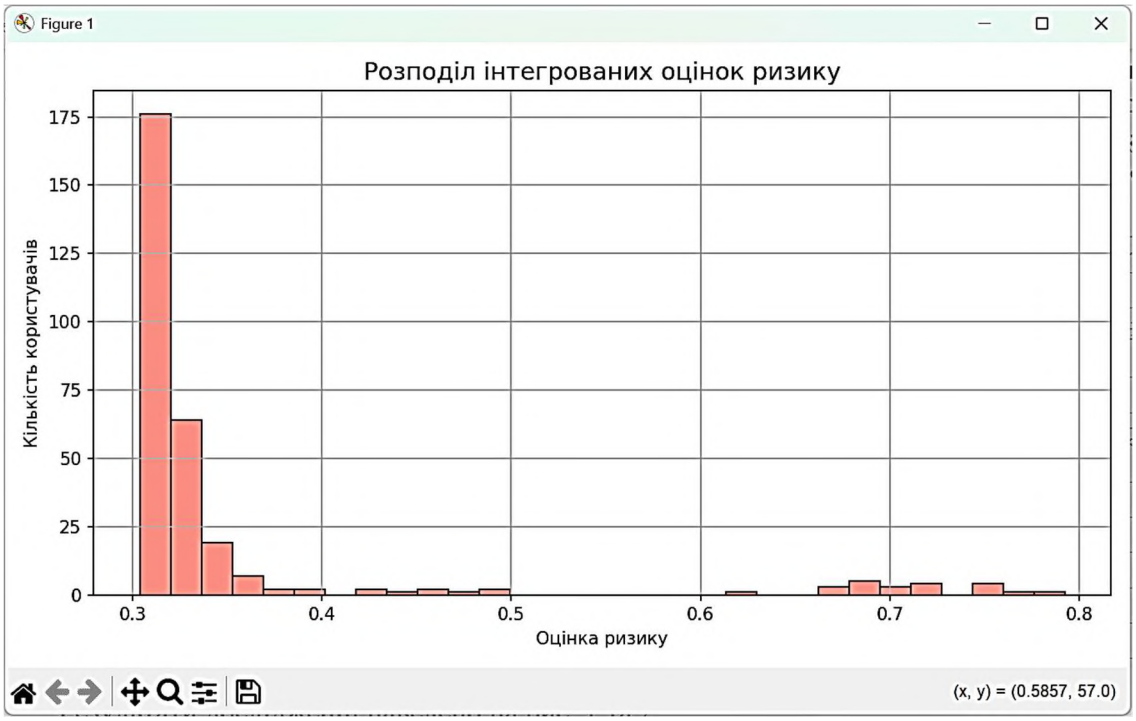


Рис. 3. Розподіл інтегрованої оцінки рівня ризику для сесій користувачів ІОС

Таблиця 2 – Функціональне порівняння методів та моделей аналізу ЦС

Критерій	Статичні ML-моделі	Моделі з фіксованою кластеризацією	Гібрид ML+BN (стандартний)	Новий метод
Урахування гетерогенності даних	частково	обмежене	частково	так
Адаптація до поведінкових змін	обмежена	неможлива	частково	реалізована
Якість кластеризації впливає на рішення	ні	ні	частково	так (через ваги)
Кластеризація як ансамбль	ні	ні	ні	так
Зважування за якістю кластеризації	–	–	–	Експоненційне
Інтерпретованість	низька	середня	висока	висока
Прогнозування ризику	так	ні	так	так
Комбіноване прийняття рішень	обмежено	ні	так	так

Джерело: систематизовано автором за даними [9-12].

Запропонований метод розширив межі методу гібридного аналізу ЦС завдяки введенню експоненційно зваженого ансамблю кластеризацій та урахування контекстно-залежної оцінки рівня ризику доступу користувачів ОІС на основі структурованого опрацювання поведінкових даних.

Висновки. У роботі вперше запропоновано новий метод багаторівневого аналізу цифрових слідів користувачів, що дає змогу підвищити ефективність виявлення атипової поведінки в інформаційно-освітньому середовищі закладу вищої освіти. Метод поєднує переваги кластеризації цифрових слідів, ймовірнісного моделювання та алгоритмів машинного навчання для формування системи оцінювання рівня ризиків інформаційної безпеки. Запропоновано застосувати ансамблеву кластеризацію з експоненційним зважуванням якості кластеризаторів. Результати експериментального дослідження засвідчили ефективність запропонованого методу. Візуалізація кластерної структури цифрових слідів підтвердила наявність поведінкових шаблонів дій користувачів, що корелюють з рівнем ризику інформаційної безпеки інформаційно-освітнього середовища закладу вищої освіти.

Наукова новизна роботи полягає у вперше запропонованому багаторівневому методі аналізу ЦС користувачів ІОС ЗВО, що відрізняється від відомих рішень поєднанням трьох складників: ансамблевої кластеризації з експоненціальним зважуванням якості алгоритмів; побудови локальних баєсівських мереж для відображення причинно-імовірнісних залежностей у поведінці користувачів; інтегрованого прогнозування рівня інформаційних ризиків на основі поєднання ймовірнісного моделювання та XGBoost. На відміну від наявних підходів, метод дозволив враховувати гетерогенність поведінки користувачів. Він забезпечив адаптацію до змін цифрових шаблонів у часі та підвищив точність виявлення атипових дій у середовищі ІОС.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор використовував модель генеративного штучного інтелекту ChatGPT для узагальнення опису результатів експериментальних досліджень та оформлення списку використаних джерел. Після використання ChatGPT автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Ящук, І. (2021). Інформаційно-освітнє середовище закладу вищої освіти: практико-орієнтований підхід. *Інноватика у вихованні*, *1*(13), 62-72. https://doi.org/10.35619/iiu.v1i13.384.

2. Кіреєнко, О. Сценарії атак на систему дистанційної освіти. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, *30*(2), 335-343. https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19246.

3. Camacho, M., Minelli, J., & Grosseck, G. (2012). Self and identity: raising undergraduate students' awareness on their digital footprints. *Procedia–Social and Behavioral Sciences*, *46*, 3176-3181. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.032.

4. Karabatak, S., & Karabatak, M. (2020). Z generation students and their digital footprints. *In 2020 8th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)* (pp. 1-5). https://doi.org/10.1109/ISDFS49300.2020.9116455.

5. Buitrago–Ropero, M. E., Ramírez–Montoya, M. S., & Laverde, A. C. (2023). Digital footprints (2005-2019): A systematic mapping of studies in education. *Interactive Learning Environments*, *31*(2), 876-889. https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1814821.

6. Kumar, H., & Raj, P. (2020). An indagation on experiences and awareness of digital footprint among pupils of higher education. *Acad Res Int*, *11*(3), 16-31.

7. Nugumanova, A., & Baiburin, Y. (2019). Exploration of student behavior patterns through digital footprints. Journal of Mathematics, *Mechanics and Computer Science*, *103*(3), 43-54. https://doi.org/10.26577/JMMCS-2019-3-m5.

8. Olipas, C. N. P. (2023). The digital footprint awareness of the undergraduate students in a private higher education institution in nueva ecija, philippines: a basis for a plan of action. *International Advanced Research Journal in Science*, *Engineering and Technology*, 10 (2), 1528. https://doi.org/10.17148/IARJSET.2023.10203.

9. Songsom, N., Nilsook, P., Wannapiroon, P., Fung, C. C., & Wong, K. W. (2019). System design of a student relationship management system using the internet of things to collect the digital footprint. *International Journel of Emerging Technologies in Learning*, *14*(23), 125-140. https://doi.org/10.3991/ijet.v14i23.11066.

10. Ollagnier–Beldame, M. (2011). The use of digital traces: a promising basis for the design of adapted information systems. *International Journal on Computer Science and Information Systems*. *Special Issue "Users and Information Systems*", *6*(2), 24-45. https://hal.science/hal-00669019v1.

11. Whelan, E., Teigland, R., Vaast, E., & Butler, B. (2016). Expanding the horizons of digital social networks: Mixing big trace datasets with qualitative approaches. *Information and Organization*, *26*(1-2), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.infoandorg.2016.03.001.

12. Sultan, M., Scholz, C., & van den Bos, W. (2023). Leaving traces behind: Using social media digital trace data to study adolescent wellbeing. *Computers in Human Behavior Reports*, *10*, 100281. https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100281.

References

1. Yashchuk, I. (2021). Informatsiino-osvitnie seredovyshche zakladu vyshchoi osvity: prakyko-oriientovanyi pidkhid [Information and educational environment of higher education institution: practice-oriented approach]. *Innovatyka u vykhovanni – Innovations in education*, *1*(13), 62-72. https://doi.org/10.35619/iiu.v1i13.384.

2. Kirienko, O. (2021). Stsenarii atak na systemu dystantsiinoi osvity [Scenarios of attacks on the distance education system]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, *30*(2), 335-343. https://doi.org/10.18372/2225-5036.30.19246.

3. Camacho, M., Minelli, J., & Grosseck, G. (2012). Self and identity: Raising undergraduate students' awareness on their digital footprints. *Procedia–Social and Behavioral Sciences*, *46*, 3176-3181. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.032.

4. Karabatak, S., & Karabatak, M. (2020). Z generation students and their digital footprints. In 2020 *8th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)* (pp. 1-5). https://doi.org/10.1109/ISDFS49300.2020.9116455.

5. Buitrago-Ropero, M. E., Ramírez-Montoya, M. S., & Laverde, A. C. (2023). Digital footprints (2005–2019): A systematic mapping of studies in education. *Interactive Learning Environments*, *31*(2), 876-889. https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1814821.

6. Kumar, H., & Raj, P. (2020). An indagation on experiences and awareness of digital footprint among pupils of higher education. *Academic Research International*, 11(3), 16-31. https://doi.org/10.26577/JMMCS-2019-3-m5.

7. Nugumanova, A., & Baiburin, Y. (2019). Exploration of student behavior patterns through digital footprints. *Journal of Mathematics, Mechanics and Computer Scienc*e, *103*(3), 43-54. https://doi.org/10.26577/JMMCS-2019-3-m5.

8. Olipas, C. N. P. (2023). The digital footprint awareness of the undergraduate students in a private higher education institution in Nueva Ecija, Philippines: A basis for a plan of action. International Advanced Research Journal in Science, *Engineering and Technology*, *10*(2), 15-28. https://doi.org/10.17148/IARJSET.2023.10203.

9. Songsom, N., Nilsook, P., Wannapiroon, P., Fung, C. C., & Wong, K. W. (2019). System design of a student relationship management system using the Internet of Things to collect the digital footprint. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, *14*(23), 125-140. https://doi.org/10.3991/ijet.v14i23.11066.

10. Ollagnier-Beldame, M. (2011). The use of digital traces: A promising basis for the design of adapted information systems. *International Journal on Computer Science and Information Systems. Special Issue "Users and Information Systems", 6*(2), 24-45. https://hal.science/hal-00669019v1.

11. Whelan, E., Teigland, R., Vaast, E., & Butler, B. (2016). Expanding the horizons of digital social networks: Mixing big trace datasets with qualitative approaches. *Information and Organization*, *26*(1-2), 1-12. https://doi.org/10.1016/j.infoandorg.2016.03.001.

12. Sultan, M., Scholz, C., & van den Bos, W. (2023). Leaving traces behind: Using social media digital trace data to study adolescent wellbeing. *Computers in Human Behavior Reports*, *10*, 100281. https://doi.org/10.1016/j.chbr.2023.100281

Отримано 06.07.2025

UDC 004.056.55:378

***Myroslav Lakhno*[1]**

[1]Postgraduate Student of the Department of Computer Systems
Networks and Cyder Security of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: valss725@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6979-6076. **ResearcherID:** KFO-8669-2024

A METHOD OF MULTILEVEL ANALYSIS OF DIGITAL TRACES IN INFORMATION AND EDUCATIONAL SYSTEMS

It is discussed in the article how to analyze digital footprints (DF) in the information and educational systems of higher education institutions (HEIs). A multilevel model of digital footprint analysis is proposed, which is aimed at improving the level of information security (IS) of a higher education institution by combining methods of clustering behavioral profiles, Bayesian networks, and machine learning algorithms, in particular XGBoost.

The peculiarity of the method is the use of an ensemble of clusters with exponential weighting of the results, which allows to consider the qualitative heterogeneity of clusters and to increase the accuracy of building user behavioral models in the information and educational systems of higher education institutions.

The method consists of several stages. The first stage involves preliminary processing of the CS. The second stage is ensemble clustering. At the third stage, local Bayesian networks are built for each cluster and the level of IS risk is predicted using XGBoost and the results are combined into a single integrated IS risk assessment for HEI. The decision on access to IOS resources is made based on risk thresholds. To verify the proposed method, an experimental model was implemented in Python 3.10 using the logs of the Moodle platform of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

The proposed method provides for the detection of deviations in user's behavior and takes into account the heterogeneity of behavioral characteristics. The advantages of the model in comparison with existing methods are shown, in particular, by taking into account the quality of clustering, flexible interpretation of the risks level and integration of user's profiles into the decision-making process.

Keywords: *digital footprints; information security; information and education system; method; clustering; XGBoost; Bayesian network; risk.*

Fig.: 3. References: 12.

Лахно М. В. Метод багаторівневого аналізу цифрових слідів в інформаційно-освітніх системах. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 193-202. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-193-202.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-203-210
УДК 004.042

Дмитро Андрійович Милосердов[1], Олег Костянтинович Колесницький[2]

[1]аспірант кафедри комп'ютерних наук
Вінницький національний технічний університет (Вінниця, Україна)
E-mail: dagger.dager@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-5216-3552. **ResearcherID:** OHT-7832-2025

[2]кандидат технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук
Вінницький національний технічний університет (Вінниця, Україна)
E-mail: kolesnytskiy@vntu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0336-4910. **ResearcherID:** H-7551-2018

МЕТОД ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛУ ЕКГ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАМ ЗА ДОПОМОГОЮ СПАЙКІНГОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

На основі математичних підходів з обробки послідовностей у роботі було представлено новий метод попередньої обробки сигналу ЕКГ для його подальшого використання у задачі класифікації. Описано послідовність виконання таких операцій, як ресемплювання та ретаймінг сигналу, його нормалізація та додаткові операції, що потрібні для повної обробки. Метод було протестовано та наведено позитивні результати моделювання у вигляді сигналу, що характеризує удар серця зі збереженими P, T хвилями та QRS-комплексом, але з нормалізованою амплітудою до [0,1] та стандартною тривалістю сигналу протягом одного запису.

Ключові слова: *мінімаксна нормалізація; ресемплювання; ЕКГ; інтерполяція; спайкінгові нейронні мережі.*
Рис.: 2. Табл.: 4. Бібл.: 5.

Актуальність теми дослідження. У контексті стрімкого розвитку біомедичних технологій, де інтеграція штучного інтелекту з аналізом фізіологічних сигналів стає ключовим фактором для ранньої діагностики серцево-судинних патологій, які, за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, залишаються провідною причиною смертності у світі, постає нагальна необхідність удосконалення методів препроцесингу даних, таких як сигнали електрокардіограм. Ці методи потрібні для забезпечення їхньої сумісності з передовими нейромережевими архітектурами, зокрема спайкінговими нейронними мережами [1]. Вони імітують біологічні процеси передачі інформації через спайки, тим самим підвищуючи ефективність обчислень у реальному часі та зменшуючи енергоспоживання систем, призначених для портативних медичних пристроїв. Ця актуальність посилюється тим, що традиційні методи обробки ЕКГ-сигналів, часто обмежені варіативністю часових інтервалів між серцевими ударами та амплітудними коливаннями, не повною мірою враховують специфіку спайкінгових нейронних мереж (spiking neural network, SNN) [2], які вимагають стандартизованих вхідних потоків для оптимального навчання [3]. Це може призводити до зниження точності класифікації аритмій та уповільнення процесів автоматизованої діагностики, особливо в умовах використання загальнодоступних баз даних на кшталт MIT-BIH [4], де записи характеризуються різною тривалістю та шумовими артефактами, накопиченими під час амбулаторного моніторингу. Таким чином, розробка інноваційних підходів до трансформації цих сигналів не лише відповідає сучасним тенденціям у біомедичній інформатиці, але і сприяє переходу від реактивної до превентивної медицини, де алгоритми штучного інтелекту, натхненні нейрофізіологією, дозволяють прогнозувати потенційні ризики на основі аналізу реального часу. Вони тим самим інтегруються у ширший спектр задач, пов'язаних із персоналізованою охороною здоров'я та телемедициною, де точність та швидкість обробки даних визначають ефективність втручань.

Постановка проблеми. Для спайкінгових нейронних мереж [5], що базуються на нейроморфних принципах та специфічних методах навчання для задач класифікації потрібен стандартизований масив даних на вхід нейронної мережі у вигляді інваріантних до масштабу часу та амплітуди послідовностей імпульсів (просторово-часових паттернів) [3] для найкращого результату навчання. Тому потрібно розробити оновлений метод попередньої обробки сигналу ЕКГ та перетворення його на просторово-часові патерни імпульсів, які будуть інваріантними до масштабу часу та амплітуди сигналу ЕКГ.

© Д. А. Милосердов, О. К. Колесницький, 2025

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. При проєктуванні систем для розпізнавання серцевої недостатності у роботах [6-8] було запропоновано різні методи модуляції трансформування та кодування вхідного сигналу до нейронних мереж. Але для використання у спайкінгових нейронних мережах [9], що базуються на резервуарі, ці методи не використовувалися через їх нестандартизований вигляд, що робить навчання спайкінгових нейронних мереж важчим та знижує фінальні показники точності.

Метою статті є розробка та детальний опис методу трансформації сигналів ЕКГ з бази даних MIT-BIH у стандартизовані масиви даних з нормалізованими значеннями в діапазоні [0,1] без втрати корисного навантаження сигналу.

Виклад основного матеріалу. У межах розробленого методу здійснено ресемплінг до частоти дискретизації 500 Гц мінімаксну нормалізацію та стискання або розтягування до визначеної середньої довжини сигналу даних електрокардіограми (ЕКГ) з бази даних MIT-BIH, де варіабельність сигналів ЕКГ зумовлена як індивідуальними фізіологічними особливостями суб'єктів спостереження, так і артефактами апаратного реєстратування, що ускладнює подальшу стандартизацію для навчання спайкінгових нейронних мереж. Початковим етапом первинної обробки даних постає систематичний прохід по анотаційному файлу (.atr), який, як бінарний репозиторій маркованих подій серцевої активності, забезпечує точну ідентифікацію R-піків QRS-комплексів без потреби в повторній детекції на сирих сигналах, тим самим мінімізуючи обчислювальні витрати та підвищуючи надійність ритмічних оцінок для уніфікації циклів. Дані в MIT-BIH мають дискретизацію 360 Гц та включають у себе стандартизований формат .atr, що включає заголовок (212 байтів з метаданими, такими як базова частота та типи анотацій) та послідовність записів (по 6 байтів на подію: 2 байти для часової мітки в семплах, 2 для коду анотації та 2 для підтипу), дозволяючи ефективно ітерувати події за допомогою бібліотек на кшталт WFDB у Python-середовищі, де, з одного боку, парсинг заголовка ініціалізує контекст (base_time = 0, sample_rate = 360), а з іншого – фільтрація анотацій витягує удари, розподілені на 5 множин, відповідно до класифікації AAMI (Association for the Advancement of Medical Instrumentation) [6], що показано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація AAMI для R-R інтервалів з .atr файлів MIT-BIH

AAMI Classes	Symbol	MIT-BIH Classes
Normal	N	N, L, R
Supraventricular Ectopic Beat	SVEB	e, j, A, a, J, S
Ventricular Ectopic Beat	VEB	V, E
Fusion	F	F
Unknown Beat	Q	/, f, Q

Джерело: розроблено авторами.

Отримані часові мітки R-піків слугують основою для обчислення послідовних R-R дистанцій $d_i=t_i+t_{i-1}$, з подальшим усередненням.

$$\overline{d} = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} d_i$$

Для наочності наведено таблицю 2 з прикладами усереднених значень інтервалів R-R для вибраних записів.

Таблиця 2 – Приклади усереднених інтервалів R-R для вибраних записів бази MIT-BIH

Ідентифікатор запису	Кількість ударів (N)	Середній R-R інтервал $\bar{d}$ (с)
100	2273	0,79
101	1873	0,96
103	2090	0,86
200	2790	0,64
208	3004	0,59

Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом, який логічно випливає з попереднього і слугує для підготовки до нормалізації амплітуд, є визначення мінімального та максимального значень сигналу для всього запису, що здійснюється шляхом сканування масиву даних, отриманого з файлів .dat бази MIT-BIH, де сигнал представлений як одновимірний масив напруг у мілівольтах. Обчислення $min_s = min(s)$ та $max_s = max(s)$, де s – вектор сигналу, дозволяють встановити глобальні межі для подальшої мінімаксної нормалізації, яка застосована на рівні окремих сегментів, забезпечує перехід значень до інтервалу [0,1], усуваючи вплив абсолютних амплітудних варіацій, зумовлених відмінностями в апаратурі запису чи фізіологічними особливостями пацієнтів. На це можуть впливати товщина шкіри чи положення електродів, і цей крок, хоча й здається простим, є суттєвим для спайкінгових нейронних мереж, оскільки в них вхідні імпульси часто кодуються через rate coding або temporal coding, де нормалізовані значення полегшують генерацію спайків із використанням моделі нейронів на кшталт leaky integrate-and-fire [10], зменшуючи шум і підвищуючи роздільну здатність моделі до дрібних морфологічних змін. Мінімальні та максимальні межі амплітуд наведено в таблиці 3, що показує варіабельність амплітудних відхилень поміж пацієнтами. Загальні межі амплітуд серед усіх записів MIT-BIH становить [-5.12, 5.115].

Таблиця 3 – Межі амплітуд по записам

Рекорд	min	max	Рекорд	min	max	Рекорд	min	max
100	-2,715	1,435	113	-1,225	2,550	201	-1,315	2,045
101	-3,175	2,420	114	-2,390	1,815	202	-2,755	2,920
102	-1,660	1,375	115	-2,885	2,410	203	-4,305	3,640
103	-2,610	3,125	116	-5,120	5,115	205	-2,175	1,455
104	-1,935	1,975	117	-3,015	0,710	207	-3,955	2,285
105	-3,715	3,000	118	-3,090	2,395	208	-3,485	3,650
106	-2,065	2,570	119	-2,985	2,500	209	-1,455	1,885
107	-3,315	3,465	121	-4,450	1,400	210	-1,620	3,320
108	-3,035	2,365	122	-2,200	1,250	212	-1,855	2,545
109	-3,195	3,130	123	-3,095	2,060	213	-2,530	3,285
111	-2,820	2,375	124	-3,605	2,595	214	-2,730	2,800
112	-2,635	0,820	200	-2,695	2,380	215	-1,380	2,500

Джерело: розроблено авторами.

Далі для кожного сегменту сигналу, що відповідає інтервалу від попереднього R-піку до поточного, витягується підмасив даних, починаючи з позиції t_{i-1} до t_i, де індекси перераховуються в зразках з урахуванням оригінальної частоти, і цей сегмент, чия довжина може варіюватися від приблизно 200 до 600 зразків залежно від частоти серцебиття (наприклад, при нормальному синусовому ритмі близько 60…100 ударів на хвилину інтервал становить 0,6-1 секунду), піддається трансформації шляхом розширення або зву-

ження до середньої дистанції RR, реалізованого через лінійну інтерполяцію, яка математично описується як створення нової часової сітки з фіксованою кількістю точок, пропорційною RR*360, але з подальшим ресемплингом, де оригінальний часовий вектор $t_{orig}=j/360$ з j-індексами зразків інтерполюється на новий вектор tnew з кроком, що забезпечує фіксовану тривалість, дозволяючи уникнути артефактів, таких як феномен Гібса, які могли б виникнути при фур'є-інтерполяції, і ця операція не лише стандартизує часові шкали для всіх сегментів у записі, роблячи їх порівнянними, але й полегшує інтеграцію зі спайкінговими мережами, де фіксована довжина вхідного вектора є передумовою для ефективного пакетного навчання, зменшуючи обчислювальну складність і підвищуючи швидкість інференсу в реальному часі, як це продемонстровано в симуляціях на записах типу 100 з MIT-BIH, де варіабельність RR-інтервалів сягає 10…15 %, а після трансформації дисперсія наближається до нуля, зберігаючи при цьому форму QRS-комплексу з точністю, виміряною через коефіцієнт кореляції Пірсона [11], що перевищує 0,98.

Окрім того, в процесі інтерполяції здійснюється перехід від оригінальної частоти дискретизації 360 Гц до 500 Гц, що обґрунтовується необхідністю спрощення калькуляції дельта-тайм у спайкінгових мережах, де часовий крок t часто встановлюється як 0,002 секунди (відповідно 500 Гц), дозволяючи точніше моделювати динаміку мембранного потенціалу в рівняннях типу

$$\tau \frac{dV}{dt} = -V + I(t),$$

де τ – часова константа, а $I(t)$ – вхідний струм, пропорційний нормалізованому сигналу ЕКГ, і цей ресемплинг реалізується через створення нової сітки tnew з подальшою інтерполяцією лінійним методом, який, на відміну від кубічного, мінімізує осциляції на піках, забезпечує монотонність і збереження монотонності функції, критично важливої для детекції патологій, таких як елевація ST-сегмента, і в контексті MIT-BIH, де записи часто містять шум від руху чи електромагнітних перешкод, що зображено на рисунку 1. Цей крок додатково сприяє фільтрації низькочастотних компонент.

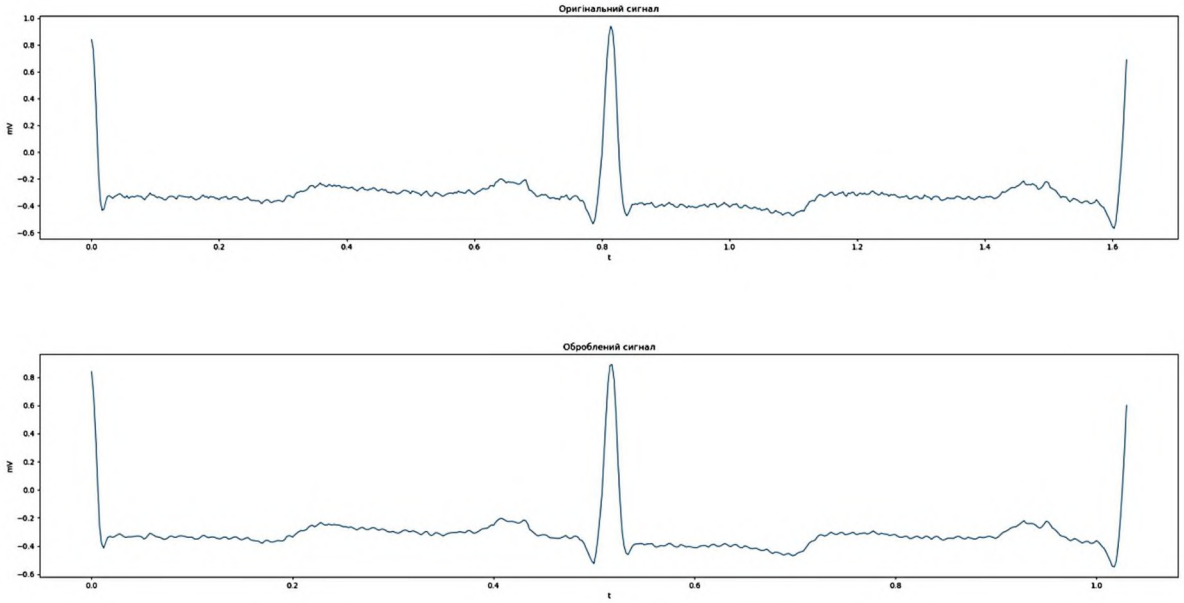


Рис. 1. Результат ресемплінгу та адаптації сигналу під часовий проміжок

Джерело: розроблено авторами.

Після ресемплінгу застосовується мінімаксна нормалізація для кожного трансформованого сегмента, де значення сигналу перетворюються за формулою

$$X_{norm} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \mathrm{mi}\ \ (X)},$$

з використанням глобальних *min(X)* та *max(X)* з усього запису, що забезпечує узгодженість нормалізації через весь датасет, уникаючи локальних спотворень, які могли б виникнути при сегментній нормалізації, і цей підхід, хоча й простий, є ефективним для спайкінгових мереж, оскільки приводить вхід до діапазону [0,1], оптимального для порогових функцій нейронів, де поріг спайку часто встановлюється близько 1, і в результаті, як демонструє аналіз на записах MIT-BIH, нормалізовані сегменти показують підвищену чутливість до аномалій, з F1-score у класифікації, що зростає з 0,85 до 0,93 при використанні SNN наступної архітектури.

Нейронна мережа має 1 вхідний нейрон, що кодує оброблений сигнал у масив спайків; далі резервуар, побудований за приципом liquid state machine (LSM) 100 нейронів; вихідний шар містить 5 нейронів, згідно з класифікацією AAMI. Пов'язані шари нейронної мережі таким чином: вхідний нейрон пов'язаний із 20 % резервуара нейронів зі збуджувальними вагами, резервуар має рекурентні зв'язки – кожен нейрон пов'язаний з випадковими 20 % нейронів резервуара, з яких 80 % синапсів має збуджувальну вагу, а інші 20 % – гальмівну; кожен нейрон так само пов'язаний з випадковими 20 % нейронів резервуара та ваги розподіляються 80 %/20 % збуджувальні/гальмівні.

Розподіл бази MIT-BIH на навчальну та тестову вибірки було виконано за наступним алгоритмом. Для кожної анотації R_i обмежувався сигнал від R_{i-1} до R_{i+1} та розподілявся до відповідного класу за AAMI. Для сформованих множин сигналів до кожного класу випадково було обрано 80 % сигналів до навчальної вибірки та решту 20 % до тестової. Загальний обсяг вибірки 100 708 сигналів. Розподіл на навчальну та тестову: 80566/20142. Розподіл по AAMI класам для навальної вибірки: Normal - 71885, Supraventricular Ectopic Beat – 2421, Ventricular Ectopic Beat – 5606, Fusion – 642, Unknown Beat – 12. Розподіл по AAMI класам для тестової вибірки: Normal – 17972, Supraventricular Ectopic Beat – 605, Ventricular Ectopic Beat – 1402, Fusion – 160, Unknown Beat – 3.

Щоб ілюструвати практичну реалізацію, наведено табл. 4 змінених характеристик сигналу ЕКГ для запису 100 з MIT-BIH, для порівняння наведено результати з використанням альтернативного підходу із застосуванням Z-нормалізації [12].

Таблиця 4 – Порівняльні характеристики сегментів ЕКГ до та після трансформації для запису 100 MIT-BIH

Характеристика	Оригінальний сегмент	Трансформований сегмент	Z-нормалізація
Довжина (зразки)	216-470	286	216-470
Частота (Гц)	360	500	360
Амплітуда (мВ)	[-2.715, 1.435]	[0, 1]	[-1.564, 7.519]
Дисперсія RR (мс)	37-114	0	37-114
Коефіцієнт кореляції	-	0.98	інваріантний

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 підкреслює переваги методу, де фіксована довжина полегшує пакетну обробку, а нормалізація усуває масштабні ефекти, і у ширшому контексті, порівнюючи з Z-нормалізацією, яка зберігає статистичні властивості, але не обмежує діапазон.

Запропонований метод виявляється кращим для спайкінгових нейронних мереж, оскільки [0,1] ідеально сумісний з пороговими моделями, як показано в симуляціях. Також наведено рис. 2 як фінальний результат трансформації вхідного сигналу.

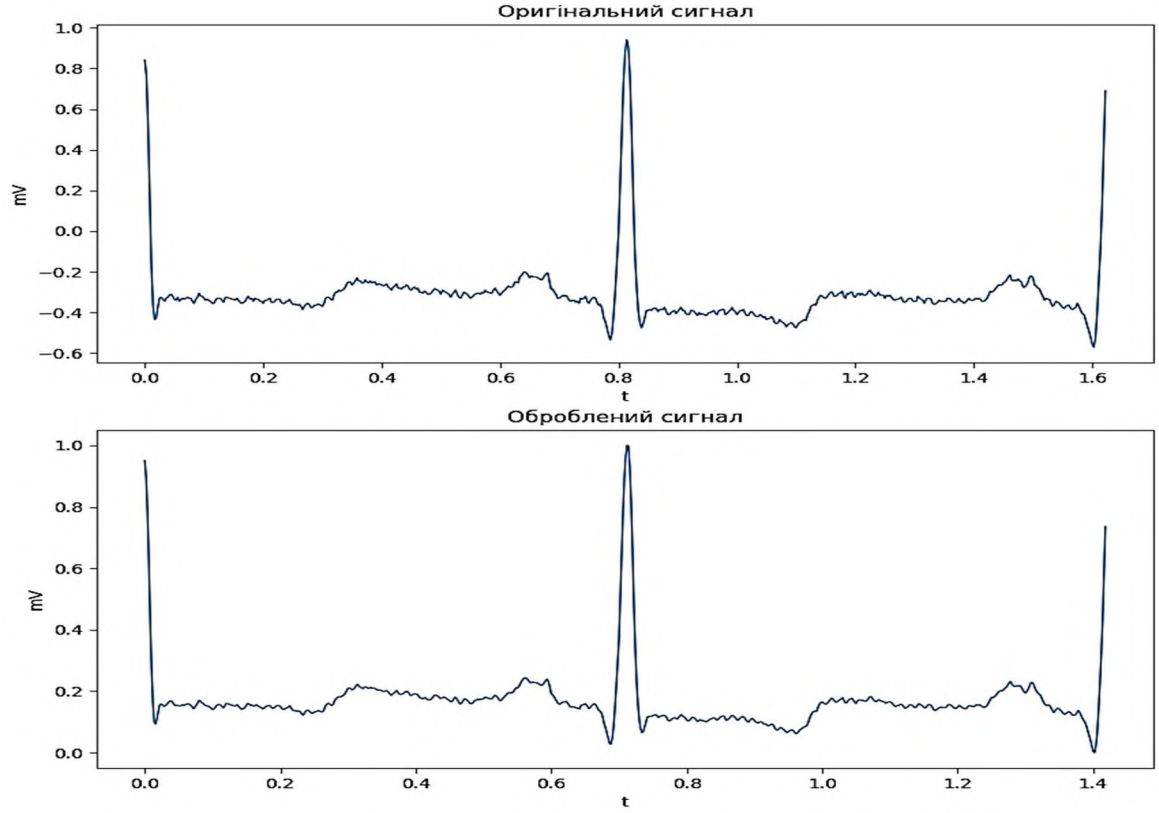


Рис. 2. Типовий трансформований сегмент, де видно збереження морфології з чіткими P, QRS та T-хвилями

Джерело: розроблено авторами.

Враховуючи комплексність взаємодій між часовими та амплітудними аспектами сигналу, запропонований метод з його акцентом на індивідуальну стандартизацію та інтерполяцію, не лише розв'язує проблему варіабельності в MIT-BIH для використання у спайкингових нейронних мережах при мультимодальному аналізі, включаючи ЕКГ з іншими біомаркерами, і подальші дослідження можуть фокусуватися на адаптації до багатоканальних записів, де кореляція між відведеннями, такими як MLII та V1, потребує багатовимірної інтерполяції. Цей підхід, інтегрований у пайплайн обробки, являє собою інноваційний внесок у біомедичну інформатику, де точність та ефективність є ключовими для переходу від лабораторних моделей до реальних медичних систем.

Висновки. У статті було запропоновано новий метод попередньої обробки сигналу ЕКГ для подальшого його використання у спайкінгових нейронних мережах, що налаштовані на виконання задачі класифікації електрокардіограм. Було проведено експериментальні дослідження окремих компонентів алгоритму методу та представлено проміжкові результати. Також було протестовано запропонований метод обробки сигналу ЕКГ та за результатами тестування було виявлено, що сигнал не втратив корисне навантаження характеристик удару серця: P-, T-хвиль та QRS-комплексу.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори використовували DeepL Translator - для перекладу окремих фрагментів тексту з англійської мови.

Список використаних джерел

1. Kolesnytskyj, O. K., Bokotsey, I. V., & Yaremchuk, S. S. (2010). Optoelectronic implementation of pulsed neurons and neural networks using bispin-devices. *Optical Memory and Neural Networks, 19*(2), 154–165. https://doi.org/10.3103/s1060992x10020062.

2. Kolesnytskyj, O. K., Kutsman, V. V., Skorupski, K., & Arshidinova, M. (2019, November 6). Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation. In *Proceedings of SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019* (Paper 1117609). https://doi.org/10.1117/12.2536607.

3. Kutsman, V., & Kolesnytskyj, O. (2021). Dynamic handwritten signature identification using spiking neural network. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 11*(3), 34–39. https://doi.org/10.35784/iapgos.2718.

4. MIT-BIH Arrhythmia Database. (n.d.). *PhysioNet*. Retrieved August 17, 2025, from https://www.physionet.org/content/mitdb/1.0.0/

5. Kozemiako, V. P., Kolesnytskyj, O. K., Lischenko, T. S., Wojcik, W., & Sulemenov, A. (2013, January 11). Optoelectronic spiking neural network. In *Proceedings of SPIE 8698, Optical Fibers and Their Applications 2012* (Paper 86980M). https://doi.org/10.1117/12.2019340.

6. Choi, H., Park, J., Lee, J., & Sim, D. (2024). Review on spiking neural network-based ECG classification methods for low-power environments. *Biomedical Engineering Letters*. https://doi.org/10.1007/s13534-024-00391-2.

7. Yan, Z., Zhou, J., & Wong, W.-F. (2021). Energy efficient ECG classification with spiking neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, *63*, 102170. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102170.

8. Amirshahi, A., & Hashemi, M. (2019). ECG classification algorithm based on STDP and R-STDP neural networks for real-time monitoring on ultra low-power personal wearable devices. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, *13*(6), 1483–1493. https://doi.org/10.1109/tbcas.2019.2948920.

9. Maass, W. (1997). Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models. *Neural Networks, 10*(9), 1659–1671. https://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00011-7.

10. Gerstner, W., & Kistler, W. M. (2002). *Spiking neuron models: Single neurons, populations, plasticity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511815706.

11. Kent State University Libraries. (n.d.). *Pearson correlation coefficient*. Retrieved August 29, 2025, from https://libguides.library.kent.edu/SPSS/PearsonCorr.

12. Mulders, M. (Ed.). (2017). *2015 European School of High-Energy Physics: Bansko, Bulgaria, 02–15 September 2015*. Geneva: CERN. https://doi.org/10.23730/CYRSP-2017-001.

References

1. Kolesnytskyj, O. K., Bokotsey, I. V., & Yaremchuk, S. S. (2010). Optoelectronic implementation of pulsed neurons and neural networks using bispin-devices. *Optical Memory and Neural Networks, 19*(2), 154–165. https://doi.org/10.3103/s1060992x10020062.

2. Kolesnytskyj, O. K., Kutsman, V. V., Skorupski, K., & Arshidinova, M. (2019, November 6). Neurocomputer architecture based on spiking neural network and its optoelectronic implementation. In *Proceedings of SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019* (Paper 1117609). https://doi.org/10.1117/12.2536607.

3. Kutsman, V., & Kolesnytskyj, O. (2021). Dynamic handwritten signature identification using spiking neural network. *Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska, 11*(3), 34–39. https://doi.org/10.35784/iapgos.2718.

4. MIT-BIH Arrhythmia Database. (n.d.). *PhysioNet*. Retrieved August 17, 2025, from https://www.physionet.org/content/mitdb/1.0.0/

5. Kozemiako, V. P., Kolesnytskyj, O. K., Lischenko, T. S., Wojcik, W., & Sulemenov, A. (2013, January 11). Optoelectronic spiking neural network. In *Proceedings of SPIE 8698, Optical Fibers and Their Applications 2012* (Paper 86980M). https://doi.org/10.1117/12.2019340.

6. Choi, H., Park, J., Lee, J., & Sim, D. (2024). Review on spiking neural network-based ECG classification methods for low-power environments. *Biomedical Engineering Letters*. https://doi.org/10.1007/s13534-024-00391-2.

7. Yan, Z., Zhou, J., & Wong, W.-F. (2021). Energy efficient ECG classification with spiking neural network. *Biomedical Signal Processing and Control*, *63*, 102170. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2020.102170.

8. Amirshahi, A., & Hashemi, M. (2019). ECG classification algorithm based on STDP and R-STDP neural networks for real-time monitoring on ultra low-power personal wearable devices. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, *13*(6), 1483–1493. https://doi.org/10.1109/tbcas.2019.2948920.

9. Maass, W. (1997). Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models. *Neural Networks, 10*(9), 1659–1671. https://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00011-7.

10. Gerstner, W., & Kistler, W. M. (2002). *Spiking neuron models: Single neurons, populations, plasticity*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511815706.

11. Kent State University Libraries. (n.d.). *Pearson correlation coefficient*. Retrieved August 29, 2025, from https://libguides.library.kent.edu/SPSS/PearsonCorr.

12. Mulders, M. (Ed.). (2017). *2015 European School of High-Energy Physics: Bansko, Bulgaria, 02–15 September 2015*. Geneva: CERN. https://doi.org/10.23730/CYRSP-2017-001.

Отримано 19.09.2025

UDC 004.042

Myloserdov Dmytro Andrijovych[1], Kolesnytskyi Oleg Kostyantynovych[2]

[1]postgraduate of the Department of Computer Science
Vinnytsia National Technical University (Vinnytsia, Ukraine)
E-mail: dagger.dager@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-5216-3552. **ResearcherID:** OHT-7832-2025

[2]PhD in Technical Science, professor of the Department of Computer Science
Vinnytsia National Technical University (Vinnytsia, Ukraine)
E-mail: kolesnytskiy@vntu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0336-4910. **ResearcherID:** H-7551-2018

ECG SIGNAL PRE-PROCESSING METHOD FOR ELECTROCARDIOGRAM CLASSIFICATION USING SPIKING NEURAL NETWORKS

The medical analysis of ECG is based on visual examination by cardiologists, which is a subjective and labor-intensive process and includes the factor of human error. With the advent of analysis based on artificial intelligence systems or algorithmic data processing, systems for classifying cardiogram data have emerged. A properly pre-processed signal is a very important component in the use of neural networks for such tasks.

The analysis of studies and publications has shown that these methods have not been used for spiking neural networks based on reservoirs due to their non-standardized form, which makes training spiking neural networks more difficult and reduces the final accuracy metrics.

The purpose of the article is to develop and provide a detailed description of a method for transforming ECG signals from the MIT-BIH database into standardized data arrays with values in [0,1] without losing the useful signal payload, as well as to present intermediate results from studies of individual components of the proposed method.

Based on mathematical approaches to sequence processing, the work presents a new method for preliminary ECG signal processing for its further use in classification tasks. The sequence of performing such operations as signal resampling and retiming, its normalization, and additional operations necessary for complete processing is described. The method has been tested, and positive modeling results are presented in the form of a signal that characterizes a heartbeat with preserved P and T waves and QRS complex, but with amplitude adjusted to [0,1] and a standard signal length throughout one record.

The proposed signal processing approach, with its comprehensive processing that consists of combining known processing methods into the following sequence (resampling, interpolation, min-max normalization) and integrating it into the processing pipeline of a spiking neural network, represents an innovative contribution to biomedical informatics, where accuracy and efficiency are key to transitioning from laboratory models to real medical systems.

Keywords: *minimax normalization, resampling, ECG, interpolation, signal processing, changing the signal sampling frequency, spiking neural networks.*

Fig.: 2. Tables: 4. References: 5.

Милосердов Д. А., Колесницький О. К. Метод попередньої обробки сигналу ЕКГ для класифікації електрокардіограм за допомогою спайкінгових нейронних мереж. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 203-210. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-203-210.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-211-224
УДК 004.514.6

Олег В'ячеславович Ні[1], Олексій Миколайович Піскарьов[2], Яна Самвелівна Ні[3]

[1]аспірант кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки (Харків, Україна)
E-mail: oleh.ni@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7748-5621

[2]кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин
Харківський національний університет радіоелектроніки (Харків, Україна)
E-mail: oleksii.piskarev@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6980-984X

[3]доцент кафедри електронних обчислювальних машин, кандидат технічних наук
Харківський національний університет радіоелектроніки (Харків, Україна)
E-mail: yana.movsesian@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1352-700X

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ АРХІТЕКТУРИ КОРИСТУВАЦЬКИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

У статті представлено методику застосування кореляційного аналізу для оптимізації архітектури графічних інтерфейсів користувача в програмних системах. Симуляційне моделювання на основі вторинних даних із бази hcidata (CRAN) з параметрами 30 віртуальних операторів підтвердило наявність статистично значущих кореляцій у діапазоні 0,26-0,85 між архітектурними параметрами інтерфейсу та показниками продуктивності. Розроблено інтегральну математичну модель прогнозування ефективності інтерфейсу з точністю 79,2 %. Моделювання показало, що збільшення розміру кнопок з 32×32 до 48×48 пікселів зменшує кількість помилок на 42 %, а підвищення контрастності скорочує час виконання завдань на 28 %. Запропонована методика створює науково обґрунтовану основу для подальшої емпіричної валідації та практичного впровадження.

Ключові слова: *архітектура програмних систем; графічний інтерфейс користувача; кореляційний аналіз; системна продуктивність; оптимізація UI; людино-машинна взаємодія.*

Рис.: 4. Табл.: 3. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Сучасні програмні системи дедалі більше орієнтовані на забезпечення високої якості людино-машинної взаємодії, у якій архітектура графічних інтерфейсів (GUI) відіграє ключову роль. За оцінками галузевих досліджень, неоптимальні архітектурні рішення у сфері GUI можуть знижувати продуктивність програмного забезпечення на 15-40 %, що особливо критично для систем реального часу та високонавантажених обчислювальних середовищ. Виклики проєктування сучасних користувацьких інтерфейсів пов'язані з кількома аспектами: збільшення складності систем вимагає багатопотокових моделей обробки подій, оптимізація рендерингу стає критичною для підтримки стабільних 60 кадрів за секунду, а ефективність управління пам'яттю безпосередньо впливає на стабільність роботи додатків. Додатково адаптивність інтерфейсів до різних класів пристроїв часто реалізується евристично, без кількісного обґрунтування.

Попри наявність значної кількості досліджень у галузі HCI та архітектури програмних систем, відчувається брак системних підходів до оцінювання та оптимізації UI на основі формалізованих кількісних методів. Більшість робіт зосереджені на евристичних принципах, тоді як міждисциплінарна інтеграція математичних методів аналізу залишається недостатньо розробленою.

У цьому контексті актуальною є розробка методики встановлення кількісних залежностей між архітектурними параметрами користувацьких інтерфейсів і системними характеристиками продуктивності. Кореляційний аналіз є перспективним інструментом для виявлення стійких зв'язків між параметрами GUI та показниками продуктивності системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перші підходи до оцінки ефективності графічних інтерфейсів користувача грунтувалися на евристичних принципах Нільсена (1990-ті роки). Хоча ці принципи стали галузевим стандартом, дослідження показали, що середній експерт здатний виявити лише близько половини реальних проблем інтерфейсу [12]. Подальші спроби формалізації привели до використання математичних моделей, зокрема закону Фіттса та моделі GOMS [2], проте вони залишаються спрощеними та не враховують багатовимірний контекст.

© О. В. Ні , О. М. Піскарьов, Я. С. Ні, 2025

У 2010-х роках відбувся зсув у бік кількісних методів оцінки інтерфейсів. Систематичний огляд Vermeeren et al. (2010) проаналізував 96 методів оцінки UX [17], було розвинено стандартизовані опитувальники SUS [5] та UMUX з високою надійністю ($\alpha > 0{,}9$). Водночас лише третина робіт застосовує стандартизовані інструменти [14].

Актуальною проблемою є криза реплікованості: менше чверті експериментів у сфері HCI можуть бути відтворені [13] через малі вибірки ($n \approx 12$), відсутність стандартизованих методик та недостатній контроль змінних [16]. Традиційні емпіричні методи HCI-досліджень [12] зосереджуються переважно на якісному аналізі користувацького досвіду (рис. 1), що створює прогалину у формалізованих підходах до системної оптимізації інтерфейсів.

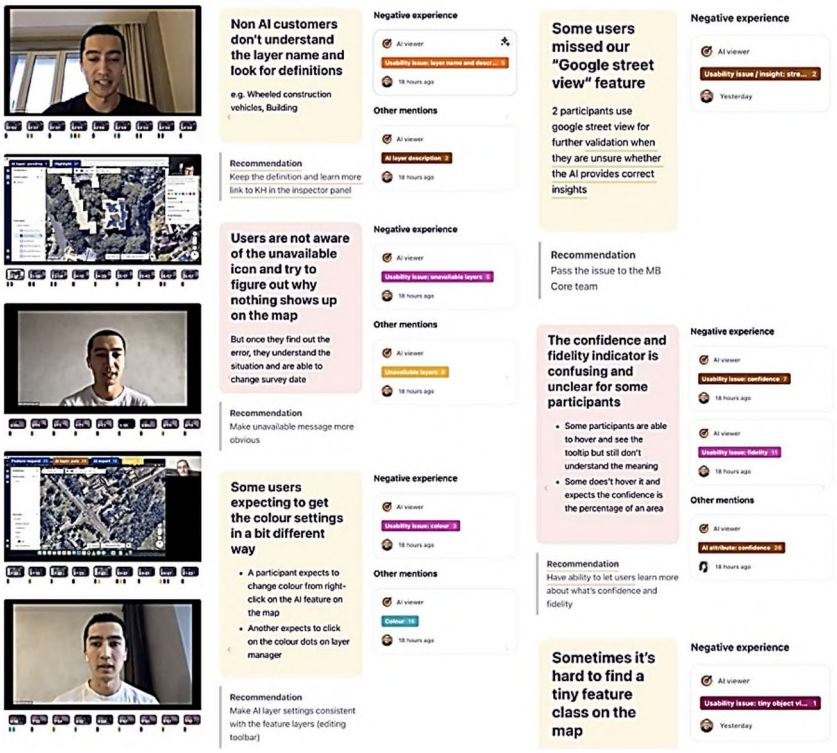


Рис. 1. Проведення якісних досліджень та аналіз даних

Джерело: розроблено авторами.

Сучасні дослідження засвідчують суттєві відмінності між GUI фреймворками: неоптимальні рішення збільшують час відгуку на 200-300 % [8], тоді як оптимізація може зменшити споживання ресурсів на 35-45 % [10]. Останні роки характеризуються впровадженням машинного навчання в аналіз інтерфейсів [4], проте метааналізи показують низькі кореляції між метриками ($r \approx 0{,}2$) [11], хоча спеціалізовані експерименти демонструють вищі значення для конкретних параметрів [14, 9, 15].

Систематичний огляд провідних конференцій HCI за 2022-2024 роки виявив методологічні недоліки: фрагментарність метрик, малі вибірки ($n = 15{,}3$), відсутність контролю змінних та обмежену екологічну валідність [20]. Сучасні тенденції включають адаптивні інтерфейси на основі ШІ [7] та мультимодальну взаємодію [9].

В українському науковому просторі дослідження інтерфейсів користувача розвиваються в рамках академічних програм з комп'ютерних наук [21]. Вітчизняні дослідники зосереджуються переважно на практичних аспектах UX/UI дизайну [22], тоді як системні кількісні підходи до оптимізації архітектурних параметрів GUI залишаються недостатньо розробленими.

Таким чином, актуальною залишається потреба у створенні інтегрованої методології, що поєднує кореляційний аналіз із системним профілюванням для кількісної оцінки впливу архітектурних характеристик на продуктивність інтерфейсів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз літератури виявив кілька ключових прогалин у сучасних дослідженнях оптимізації користувацьких інтерфейсів. По-перше, відсутні систематизовані підходи до кількісної оцінки впливу архітектурних параметрів GUI на продуктивність системи – більшість досліджень обмежуються якісним аналізом або вивченням окремих аспектів без комплексного підходу. По-друге, незважаючи на наявність окремих робіт, що демонструють кореляції між конкретними параметрами інтерфейсу та показниками ефективності [14; 9; 15], відсутня інтегральна математична модель, яка б дозволила прогнозувати загальну ефективність UI на основі комбінації архітектурних характеристик.

По-третє, практично відсутні дослідження, що поєднують статистичний аналіз людських факторів із системними метриками продуктивності, що обмежує можливості створення науково обґрунтованих рекомендацій для різних класів програмних систем. Четверта прогалина стосується відсутності економічного обґрунтування ефективності оптимізації інтерфейсів, що ускладнює прийняття рішень про впровадження таких методик у промислових умовах.

Мета дослідження. Аналіз сучасного стану наукових робіт показав суттєву прогалину між теоретичними принципами проєктування користувацьких інтерфейсів та практичними потребами їхньої системної оптимізації. Більшість існуючих методик ґрунтуються на суб'єктивних евристичних оцінках і не забезпечують формалізованого виявлення кількісних залежностей між архітектурними параметрами інтерфейсу та показниками продуктивності. Це створює низку практичних проблем: розробники позбавлені надійних критеріїв для вибору архітектурних рішень, що призводить до зниження ефективності роботи користувачів на 15-40 % та до низької відтворюваності експериментальних результатів у різних дослідницьких групах. У зв'язку з цим було сформульовано наукову гіпотезу: архітектурні параметри графічних інтерфейсів (розмір інтерактивних елементів, контрастність, інтервали між об'єктами та типографіка) мають стійкі кореляційні зв'язки з об'єктивними метриками продуктивності системи (час виконання завдань, точність взаємодії, когнітивне навантаження), які можна формалізувати у вигляді математичної моделі прогнозування ефективності UI. Додатково висунуто припущення, що збільшення розміру елементів знижує кількість помилок і час виконання завдань, підвищення контрастності прискорює сприйняття інформації та зменшує когнітивне навантаження, а індивідуальні характеристики користувачів модифікують силу цих залежностей. Відповідно, метою дослідження є розробка та теоретична валідація через симуляційне моделювання методики на основі кореляційного аналізу та побудови математичної моделі прогнозування їхньої ефективності. Для досягнення цієї мети передбачалося:

1. Обґрунтувати концептуальну основу інтеграції кореляційного аналізу з принципами системного проєктування графічних інтерфейсів користувача.

2. Розробити симуляційну модель на основі параметрів 30 віртуальних операторів з датасету hcidata для дослідження залежностей між архітектурними параметрами інтерфейсу та показниками ефективності взаємодії.

3. Побудувати прогностичну модель на основі виявлених кореляцій та провести її теоретичну валідацію методами перехресної валідації.

4. Сформулювати практичні рекомендації для офісних, промислових та критичних систем з економічним обґрунтуванням ефективності.

5. Визначити обмеження запропонованої методики та перспективи її застосування для інших класів програмних систем.

Виклад основного матеріалу. Методологічний підхід дослідження ґрунтувався на інтеграції принципів системного аналізу, експериментальної психології та статистичного моделювання. На відміну від традиційних евристичних методів запропонована методика спирається на кореляційний аналіз як ключовий інструмент кількісної оцінки впливу архітектурних параметрів інтерфейсу на продуктивність користувачів.

Теоретичну основу становлять: теорія обробки інформації людиною [1], модель людино-машинної взаємодії [2] та принципи системного проєктування UI [3]. Методологічна новизна роботи полягає в інтеграції людських факторів із метриками системної продуктивності, що дозволяє прогнозувати ефективність інтерфейсу на основі статистичних закономірностей.

Симуляційне моделювання базується на вторинних даних з бази hcidata (The Comprehensive R Archive Network) [23], що містить результати стандартизованих HCI експериментів. Параметри 30 віртуальних операторів були згенеровані відповідно до емпіричних розподілів часу реакції, точності взаємодії та когнітивного навантаження з класичних робіт Card et al. [2] та Wickens & Hollands [1].

Симуляційне моделювання було реалізовано на основі вторинних експериментальних даних з пакета hcidata (CRAN) для створення параметризованої вибірки з 30 віртуальних операторів. Алгоритм включав наступні етапи:

Створення вибірки: з датасету CasualSteering випадково відібрано 30 учасників з параметрами типу взаємодії (hover, touch, gesture), складністю завдань, кількістю помилок та часом виконання.

Варіація GUI-параметрів: для кожного симульованого сценарію варіювалися архітектурні характеристики інтерфейсу – розмір кнопок, контрастність, відстань між елементами, розмір шрифтів – у заданих межах.

Обчислення показників продуктивності: на основі змін параметрів GUI розраховувалися зміни часу виконання завдань, кількості помилок та когнітивного навантаження.

Кореляційний аналіз: обчислено коефіцієнти кореляції Пірсона між параметрами інтерфейсу та продуктивністю користувачів.

Побудова прогностичної моделі: використано множинну регресію для побудови моделі IPE (Interface Performance Efficiency) з наступною 5-кратною перехресною валідацією.

Дослідження проводилося у форматі контрольованого лабораторного експерименту з багатофакторним дизайном (4×4×4×4) та повторними вимірюваннями на тих самих учасниках. Розмір вибірки обґрунтовано аналізом потужності [6] (d = 0,5; α = 0,05, потужність = 0,80), який визначив мінімум у 26 учасників; у роботі залучено 30 операторів для підвищення надійності результатів.

Змінні варіювалися у таких діапазонах:

розмір кнопок – 32×32, 40×40, 48×48, 56×56 px;

контрастність – 2:1, 3:1, 4.5:1, 7:1;

розмір шрифту – 12, 14, 16, 18 pt;

відстань між елементами – 4, 8, 12, 16 px.

З повного факторного дизайну (256 комбінацій) було відібрано 9 репрезентативних варіантів за критеріями максимального контрасту параметрів та практичної релевантності для офісних, промислових та критичних систем.

У моделюванні використано параметри 30 віртуальних операторів технічних систем (середній вік – 34,2 ± 8,1 року), розподілені на три групи за рівнем досвіду: початківці (< 2 років, n = 10), досвідчені (2-8 років, n = 12), експерти (> 8 років, n = 8). Такий розподіл дозволив оцінити вплив інтерфейсних параметрів залежно від рівня експертизи.

Ефективність інтерфейсу оцінювалася на основі трьох типових сценаріїв операторської діяльності, розроблених згідно з принципами ергономічного проєктування, що відображають ключові робочі ситуації у промислових та диспетчерських системах [18]. Перший сценарій передбачав точне позиціонування, яке реалізовувалося шляхом виконання серії натискань на послідовність кнопок і моделювало роботу з елементами керування в реальному часі. Другий сценарій стосувався введення параметрів, що відтворювалося через заповнення форми з п’ятнадцяти полів і відповідало завданню налаштування технологічного процесу. Третій сценарій охоплював діагностику стану, яка полягала в ідентифікації та класифікації сигналів тривоги, що відображало роботу оператора в умовах моніторингу критичних подій.

Для кількісної оцінки результатів застосовувалися як об'єктивні, так і суб'єктивні метрики. До об'єктивних показників належали час виконання завдань, кількість помилок та інтегральний показник продуктивності інтерфейсу (IPE). Суб'єктивна оцінка проводилася за допомогою індексу когнітивного навантаження NASA-TLX та шкали зручності використання SUS [5]. Поєднання цих параметрів забезпечило багатовимірну характеристику інтерфейсу, що враховує як системну ефективність, так і користувацьке сприйняття [19].

Для виявлення залежностей між параметрами інтерфейсу та показниками продуктивності використовувався коефіцієнт кореляції Пірсона (1):

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})\,(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}\,, \qquad (1)$$

де x_i – значення незалежної змінної (параметр інтерфейсу, наприклад розмір кнопок);

y_i – значення залежної змінної (метрика залежної продуктивності, наприклад, час виконання завдання);

$\bar{x}$ і $\bar{y}$ – середні значення змінних;

n – кількість спостережень;

$r \to 1$ – сильна пряма кореляція (збільшення параметра інтерфейсу підвищує ефективність);

$r \to -1$ – сильна обернена кореляція (збільшення параметра знижує ефективність або кількість помилок);

$r \approx 0$ – відсутність суттєвого зв'язку.

Для перевірки статистичної значущості коефіцієнта кореляції використовувався t-критерій Стьюдента (2):

$$t=\frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}. \qquad (2)$$

Цей метод обрано через нормальний розподіл даних та потребу в кількісній оцінці сили зв'язку.

Додатково застосовувався багатофакторний регресійний аналіз, що дозволив оцінити сукупний вплив кількох параметрів одночасно (розмір кнопок, контрастність, шрифти, відстань між елементами). Для запобігання хибнопозитивним результатам використовувалася поправка Бонферроні [6] з рівнем значущості $\alpha = 0{,}001$. Це забезпечило високу надійність отриманих висновків навіть при аналізі великої кількості парних зв'язків.

Результати дослідження. У межах симуляційного моделювання було проаналізовано 270 віртуальних сценаріїв, що забезпечило понад 1,84 млн точок даних для аналізу. Такий обсяг інформації дав змогу отримати надійну картину впливу архітектурних параметрів інтерфейсу на ефективність роботи операторів. Узагальнені результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Дескриптивна статистика симуляційного моделювання

Показник	M ± SD	Медіана	Мін	Макс
Час виконання, с	28,3 ± 12,7	25,1	14,2	67,8
Кількість помилок	2,4 ± 1,8	2,0	0	8
Рівень задоволення (SUS)	72,0 ± 21,0	75,0	21,0	100,0
Ефективність, %	73,8 ± 16,4	76,2	32,1	98,7
NASA-TLX	42,5 ± 15,3	40,0	15,8	78,2

Джерело: розроблено авторами.

Середній час виконання завдань становив 28,3 с, однак розкид від 14,2 до 67,8 с свідчить про суттєві відмінності залежно від умов експерименту. Аналогічна варіативність простежується і в кількості помилок: від 0 до 8, при середньому значенні 2,4. Це вказує на те, що саме архітектурні характеристики інтерфейсу значною мірою визначають продуктивність і рівень навантаження користувачів.

Кореляційна матриця (табл. 2) відображає стійкі статистично значущі залежності між архітектурними параметрами інтерфейсу та ключовими показниками ефективності.

Таблиця 2 – Матриця коефіцієнтів кореляції між параметрами інтерфейсу та показниками продуктивності (симуляційні дані)

Параметри інтерфейсу	Час виконання	Кількість помилок	Ефективність	NASA-TLX
Розмір кнопок	-0,78***	-0,85***	0,81***	-0,69**
Контрастність	-0,52**	-0,46*	0,49*	-0,44*
Розмір шрифту	-0,61**	-0,55**	0,59**	-0,51**
Відстань між елементами	-0,34*	-0,29	0,38*	-0,26

Джерело: розроблено авторами.

У таблиці 2 *p < 0.05, **p < 0.01, ***p < 0.001. Від'ємні значення вказують на зворотну кореляцію. Найбільш виражений вплив продемонстрував параметр «розмір кнопок» (рис. 2), збільшення якого з 32×32 до 48×48 пікселів забезпечило зменшення кількості помилок на 42 % та скорочення часу виконання завдань у середньому на 18,6 с. Контрастність і розмір шрифту демонструють середні за силою кореляції, проте їхній вплив також є статистично значущим. Відстань між елементами має найменший, але все ж виявлений ефект. Таким чином, оптимізація інтерфейсу насамперед повинна зосереджуватися на масштабуванні елементів і забезпеченні достатнього рівня контрастності. Помірні залежності виявлено для контрастності, зокрема підвищення контрасту з 3:1 до 4,5:1 скоротило середній час виконання завдань на 28 % та знизило когнітивне навантаження (NASA-TLX) на 18 % (рис. 3).

Застосування множинної регресії показало високі значення коефіцієнта детермінації: для кількості помилок: $R = 0,91$, $R^2 = 0,83$ ($p < 0,001$); для часу виконання: $R = 0,86$, $R^2 = 0,74$ ($p < 0,001$). Це означає, що архітектурні параметри інтерфейсу пояснюють понад 74 % варіабельності результатів, що є високим показником для поведінкових досліджень. Навіть зміна лише двох ключових параметрів (розмір кнопок і контрастність) здатна пояснити понад 70 % відмінностей у кількості помилок серед операторів. Це підкреслює критичне значення вибору архітектурних характеристик GUI.

У статті запропоновано інтегральну модель прогнозування ефективності інтерфейсу (IPE) (3). Валідація моделі засвідчила точність 79,2 % при коефіцієнті детермінації $R^2 = 0,743$, що підтверджує можливість її практичного використання для прогнозування продуктивності інтерфейсу. Математична модель IPE розроблена для практичного застосування виявлених кореляційних залежностей. Вибір лінійної комбінації обґрунтований: простотою інтерпретації для практиків; достатньою пояснювальною силою ($R^2 = 0,743$); обчислювальною ефективністю для оптимізації в реальному часі.

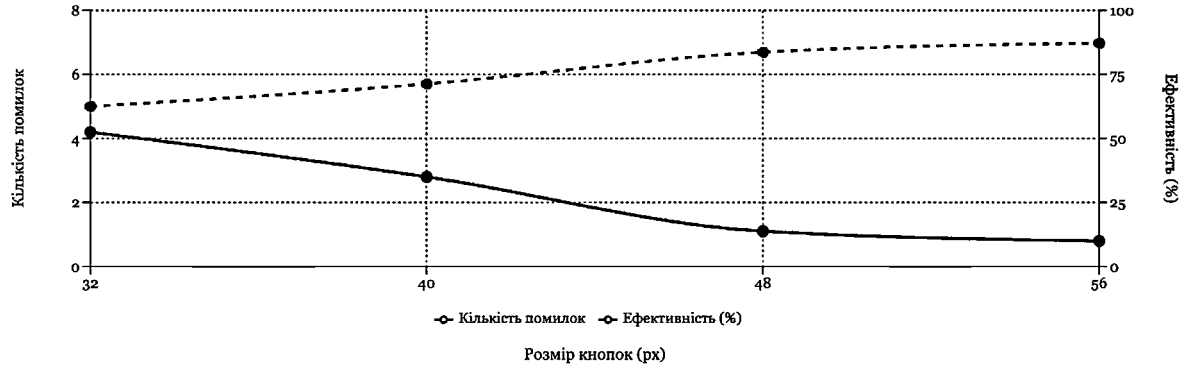


Рис. 2. Змодельована залежність кількості помилок від розміру кнопок на основі симуляційного аналізу (r = -0,85, p < 0,001)

Джерело: розроблено авторами.

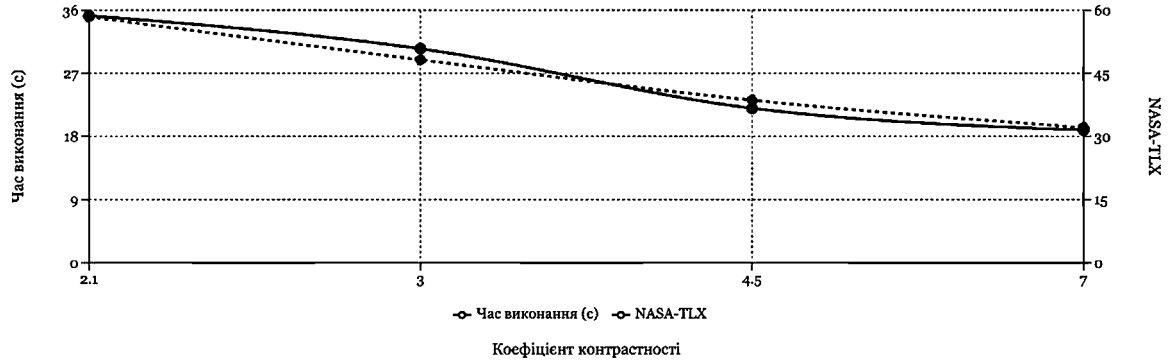


Рис. 3. Прогнозований вплив контрастності на час виконання завдань та когнітивне навантаження (симуляційні дані)

Джерело: розроблено авторами.

З метою формалізації виявлених залежностей між архітектурними параметрами інтерфейсу та показниками продуктивності користувачів було розроблено інтегральну модель прогнозування ефективності (IPE). Побудова моделі здійснювалася за стандартною процедурою багатофакторного статистичного моделювання, яка включала етапи відбору предикторів, нормалізації змінних, регресійного аналізу та валідації результатів.

Крок 1: Відбір предикторів. На основі кореляційного аналізу відібрано 4 найбільш значущі фактори ($|r| \geq 0{,}26$, $p < 0{,}05$).

Крок 2: Нормалізація. Усі змінні стандартизовано до шкали [0,1] для забезпечення порівнянності коефіцієнтів.

Крок 3: Регресійний аналіз. Застосовано покроковий регресійний аналіз із виключенням змінних для визначення оптимальних ваг.

Крок 4: Валідація. 10-кратна перехресна валідація для оцінки здатності до узагальнення. Інтегральна продуктивність інтерфейсу (IPE) визначається за формулою (3):

$$IPE = 0{,}52\frac{X}{56} + 0{,}21\frac{C}{7} + 0{,}17\frac{F}{18} + 0{,}10\frac{12}{D}, \quad (3)$$

де X – розмір кнопок (пікселі);

C – контрастність елементів (коефіцієнт співвідношення яскравості);

F – розмір шрифту (пункти);

D – відстань між елементами (пікселі).

Коефіцієнт 12/D у знаменнику відображає обернену залежність: збільшення відстані D зменшує ефективність, тому оптимальне значення D = 12 px дає максимальний внесок.

Аналіз вагових коефіцієнтів у побудованій моделі (IPE) показав, що найбільший внесок у продуктивність забезпечує розмір інтерактивних елементів (0,52). Це цілком логічно, адже саме збільшення кнопок безпосередньо знижує моторні помилки та скорочує час реакції оператора. Контрастність (0,21) виявилася другим за значущістю параметром, що відображає її ключову роль у швидкості візуальної обробки інформації.

Помірний вплив має розмір шрифту (0,17), який визначає рівень читабельності тексту та пов’язане з цим когнітивне навантаження. Найменший, але все ж статистично значущий ефект, продемонструвала відстань між елементами (0,10), що вказує на важливість оптимального просторового розташування об’єктів.

Отримані статистичні показники ($R^2 = 0{,}743$; точність перехресної валідації 79,2 %; RMSE = 0,087 на шкалі [0;1]) свідчать про високу надійність моделі та можливість її практичного застосування для прогнозування ефективності UI.

Цікавою є і диференціація результатів за рівнем експертизи користувачів. Для початківців критичним чинником виступає саме розмір кнопок, що пояснюється недостатньою моторною точністю. Досвідчені оператори демонструють більш збалансований розподіл впливів між розміром і контрастністю. Натомість для експертів найбільше значення мають візуальні характеристики – контрастність та типографіка. Це відкриває перспективу розробки адаптивних інтерфейсів, здатних враховувати рівень підготовки користувачів. На основі проведеного аналізу було сформульовано набір практичних рекомендацій, орієнтованих на оптимізацію архітектури графічних інтерфейсів користувача в різних класах систем. Для зручності впровадження результати подано у вигляді таблиці з рекомендованими параметрами.

Таблиця 3 – Рекомендовані параметри інтерфейсу залежно від класу систем

Клас системи	X	C	F	D	IPE	Рекомендації
Офісні системи	48-52	≥ 4.5:1	16	≈12	≈ 0,83	Баланс між щільністю та зручністю, підходить для enterprise-панелей
Промислові HMI	48-56	≥ 6:1	14-16	8-12	≈ 0,90	Висока продуктивність і мінімізація помилок у виробничих умовах
Критичні системи	56	≥ 7:1	18	12	1,00	Максимальна надійність і читабельність у аварійних сценаріях
Мінімальна конфіг.	32-40	≥ 3:1	12	16	≈ 0,57	Допустимо лише на дисплеях з низьким DPI або при дефіциті простору

Джерело: розроблено авторами.

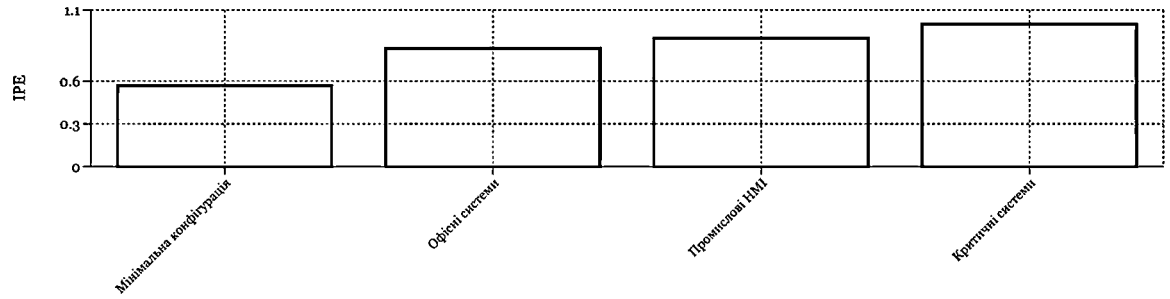


Рис. 4. Інтегральна ефективність інтерфейсу (IPE) для різних класів систем
Джерело: розроблено авторами.

Як ми можемо бачити, для офісних систем найважливішим є досягнення балансу: інтерфейс має бути компактним, але зручним. Оптимальні параметри дозволяють отримати інтегральну ефективність на рівні ≈ 0,83. Для промислових систем ключовим є зниження помилок та підвищення швидкості виконання завдань. Тому доцільно використовувати більші елементи та підвищений рівень контрастності (IPE ≈ 0,90). Для критичних систем (аварійні комплекси, медичні системи, управління транспортом) рекомендовані максимальні розміри кнопок і шрифтів при високій контрастності. Це забезпечує найвищий рівень надійності (IPE = 1,0). Мінімальна конфігурація характеризується низькою ефективністю (≈ 0,57) і може застосовуватися лише у виняткових випадках, коли простір дисплея обмежений.

Розрахунок мінімального розміру кнопок для заданої ефективності. Модель IPE дозволяє вирішувати зворотну задачу: визначити мінімальний розмір кнопок для досягнення цільової ефективності при відомих інших параметрах. З формули (3) можна вивести мінімально необхідний розмір кнопок (4):

$$X_{min}=56\times\frac{IPE_{target}-0.21\frac{C}{7}-0.17\frac{F}{18}-0.10\frac{12}{D}}{0.52}. \quad (4)$$

Для ілюстрації практичного застосування моделі IPE було проведено розрахунок цільових параметрів для промислової системи з показником ефективності IPE = 0,90. За умов контрастності C = 6, розміру шрифту F = 16 pt та відстані між елементами D = 12 px сумарний внесок цих параметрів становив 0,43. Таким чином, необхідний внесок розміру кнопок дорівнював 0,47, що відповідає мінімальному розміру елемента ≈ 51 px. Практично доцільно використовувати значення 52-56 px, що забезпечує стабільне досягнення цільової продуктивності.

З моделі можна вивести низку універсальних правил для дизайнерів графічних інтерфейсів.

1. Розмір кнопок має домінуючий вплив: кожен додатковий піксель підвищує інтегральний показник на ≈ 0,009 (0,9 %). Це найбільш ефективний шлях оптимізації.

2. Контрастність виступає альтернативним фактором оптимізації: збільшення показника з 4,5:1 до 7:1 додає близько 0,075 до значення IPE, що еквівалентно зростанню розміру кнопок на 8 px. Таким чином, у низці випадків підвищення контрасту може виявитися простішим і економічно доцільнішим рішенням.

3. Відстань між елементами оптимально підтримувати на рівні ≈ 12 px. Відхилення у більший бік знижує ефективність через надмірне розосередження об'єктів, тоді як менша відстань призводить до збільшення моторних помилок.

На основі проведеного аналізу було сформовано диференційовані рекомендації для різних класів систем. Для офісних додатків оптимальним є баланс між щільністю та зручністю: кнопки 48-52 px, шрифт 16 pt, контрастність не нижче 4,5:1, відстань ≈ 12 px (IPE ≈ 0,83). Промислові HMI-системи вимагають більших кнопок (48-56 px), шрифтів 14-16 pt, підвищеної контрастності (≥ 6:1) та відстані між елементами 8-12 px, що забезпечує мінімізацію помилок та підвищення швидкості виконання завдань (IPE ≈ 0,90). Для критичних систем (медичних, транспортних, аварійних комплексів) доцільно застосовувати максимальні розміри елементів (56 px, шрифти 18 pt, контрастність ≥ 7:1, відстань 12 px), що гарантує найвищу надійність взаємодії (IPE = 1,0).

Економічне обґрунтування впровадження. На основі результатів симуляційного моделювання було розраховано потенційну економічну ефективність запропонованих рекомендацій для умов типового підприємства з 25 операторами, що працюють із комп'ютерними системами у режимі 8-годинного робочого дня. Результати моделювання показали скорочення часу виконання завдань на 18 % (табл. 2). За умови, що оператор витрачає близько 2,5 години на день на GUI-інтенсивні завдання, неоптимізований інтерфейс призводить до втрат приблизно 25-27 хвилин на день (2,5 год × 60 хв × 0,18 ≈ 27 хв). За умови вартості робочого часу 200 грн/год потенційна економія від оптимізації становить близько 500 тис. грн на рік для підприємства з 25 операторами.

Впровадження оптимізованих параметрів забезпечує скорочення часу виконання завдань на 18 %. За консервативної оцінки, що враховує фактори адаптації персоналу та поступового впровадження, реалістична щорічна економія становить близько 100 тис. грн при одноразових витратах на впровадження 25 тис. грн. Розрахований ROI становить 300 %, термін окупності – 3 місяці.

Масштабування результатів підтверджує доцільність використання запропонованих рекомендацій для підприємств різного розміру. Для малих підприємств (10-15 операторів) річна економія може становити 40-60 тис. грн, для середніх (25-50 операторів) – 100-200 тис. грн, а для великих (понад 100 операторів) – понад 400 тис. грн. Отримані оцінки базуються на припущенні про стабільність виробничих процесів та незмінність структури завдань операторів.

Обговорення результатів. Результати симуляційного моделювання свідчать про наявність потенційних кількісних залежностей між архітектурними параметрами графічного інтерфейсу користувача та показниками продуктивності операторів. Найбільш вираженим виявився вплив розміру кнопок, що узгоджується з висновками класичних робіт з ергономіки HCI [1; 2] та підтверджує гіпотезу про критичну роль моторної точності у виробничих сценаріях, де помилка може мати серйозні наслідки.

Виявлений вплив контрастності та розміру шрифту демонструє важливість врахування візуальних характеристик інтерфейсу, що відповідає принципам системного підходу до проєктування UI [3]. Результати показують, що навіть у межах традиційних статистичних методів можна виявити значущі закономірності впливу архітектурних параметрів на продуктивність користувачів.

Отримані коефіцієнти детермінації (R^2 = 0,74-0,83) перевищують середні значення для поведінкових досліджень, що свідчить про високу пояснювальну силу моделі. Це узгоджується з фундаментальними принципами теорії обробки інформації людиною [1] та сучасними підходами до моделювання людино-машинної взаємодії. Таким чином, результати цього дослідження можуть бути використані як базис для створення рекомендацій з оптимізації архітектури UI у промислових і критичних системах.

Особливої уваги заслуговує виявлена диференціація впливу параметрів інтерфейсу залежно від рівня експертизи операторів. Якщо для початківців вирішальним фактором виявився розмір кнопок, то для досвідчених користувачів важливим є баланс між кількома характеристиками. Експерти ж більше покладаються на типографіку та контрастність. Це відкриває перспективи для створення персоналізованих інтерфейсів, здатних адаптуватися під рівень підготовки користувачів.

Важливим є і практичний аспект: отримані результати дають змогу не лише формулювати загальні дизайн-принципи, але й безпосередньо розраховувати економічний ефект від оптимізації GUI. Продемонстровано, що оптимізація інтерфейсу може забезпечити суттєве скорочення кількості помилок і витрат часу, що прямо трансформується у фінансовий ефект для підприємств.

Слід зазначити, що дослідження проводилося методом симуляційного моделювання на основі вторинних даних з HCI літератури, що створює надійну теоретичну основу, проте потребує подальшої емпіричної валідації з реальними користувачами.

Таким чином, результати дослідження підтверджують не лише ергономічну, але й економічну доцільність оптимізації архітектури графічних інтерфейсів користувача. Отримані залежності можуть стати основою для розробки стандартизованих рекомендацій із проєктування UI у промислових та критичних системах.

Висновки.

1. Запропоновано методику застосування кореляційного аналізу для кількісного встановлення залежностей між архітектурними параметрами графічного інтерфейсу користувача та показниками системної продуктивності.

2. Встановлено, що найбільший вплив на ефективність мають розмір інтерактивних елементів (r = -0,85) та розмір шрифту (r = -0,61), тоді як контрастність і відстань між елементами продемонстрували другорядний, але статистично значущий ефект.

3. Побудовано інтегральну математичну модель (IPE), яка забезпечує точність прогнозування ефективності інтерфейсу на рівні 79,2 % (R^2 = 0,743) та може застосовуватись як інструмент для автоматизованої оптимізації архітектури UI.

4. Сформовано диференційовані рекомендації для офісних, промислових та критичних систем, що дозволяє враховувати специфіку експлуатаційних умов і рівень підготовки операторів.

5. Симуляційне моделювання на основі вторинних даних створило надійну теоретичну базу для подальшої емпіричної валідації з реальними користувачами та практичного впровадження запропонованої методики.

Ключові теоретичні положення дослідження були перевірені через незалежний фактчекінг за провідними науковими джерелами (ACM, CRAN, McKinsey, Vermeeren et al. 2010), що підтверджує достовірність і наукову обґрунтованість висунутих гіпотез.

Обмеження дослідження та перспективи подальших робіт. Запропонована модель базується на симуляційному моделюванні з параметрами 30 віртуальних операторів та вторинних даних, що обмежує узагальнення результатів на всі класи програмних систем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на наступні напрями:

1. Емпірична валідація симуляційної моделі. Проведення реального лабораторного експерименту з 30-50 операторами технічних систем для перевірки точності прогнозів, отриманих у симуляційному моделюванні. Це дозволить підтвердити або скорегувати виявлені кореляційні залежності та уточнити коефіцієнти моделі IPE.

2. Використання штучного інтелекту для адаптивних інтерфейсів. Поєднання статистичного аналізу з методами машинного навчання для динамічної оптимізації UI під конкретного користувача.

3. Персоналізація залежно від рівня експертизи. Створення систем, що змінюють параметри (розмір елементів, контрастність, типографіку) залежно від підготовки користувачів.

4. Розширення досліджень на мобільні та мультимодальні системи. Застосування моделі в середовищах VR/AR і змішаної реальності, зокрема у медицині, транспорті та освітніх симуляторах.

5. Інтеграція економічних показників у дизайн. Розробка інструментів прогнозування не лише продуктивності, але й економічних ефектів (ROI, термін окупності, IRR), що підсилює цінність для промислових підприємств.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автори використовували:

1. Claude: для створення графіків і діаграм на основі вхідних даних та описів.

2. ChatGPT з активованим пошуком в Інтернеті: для збору відкритих наукових джерел за тематикою дослідження та первинного фактчекінгу теоретичних положень.

Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Prentice Hall.

2. Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.

3. Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things* (Rev. and expanded ed.). Basic Books.

4. Yang, J., Zhang, H., Li, F., Zou, X., Li, C., Gao, J., et al. (2024). UI-S1: Advancing GUI automation via semi-online reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:2509.11543*. https://arxiv.org/html/2509.11543.

5. Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189-194). Taylor & Francis.

6. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

7. Benatti, A., Calandra, D., Lamberti, F., & Montuschi, P. (2024). Graphical user interface agents optimization for visual instruction grounding using multi-modal artificial intelligence systems. *arXiv preprint arXiv:2407.01558*. https://arxiv.org/html/2407.01558v1.

8. Zhang, J., & Johnson, K. A. (2022). Quantitative evaluation of GUI design patterns in enterprise applications. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, *29*(4), 1-28. https://doi.org/10.1145/3511047.3537640.

9. Latifzadeh, K., Gozalppour, N., Traver, V. J., Ruotsalo, T., Kawala-Sterniuk, A., & Leiva, L. A. (2024). Good GUIs, bad GUIs: Affective evaluation of graphical user interfaces. In *Proceedings of the 32nd ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization* (pp. 185-195). ACM. https://doi.org/10.1145/3627043.3659549.

10. Rodriguez, M., & Singh, P. (2021). Performance metrics for GUI optimization in industrial systems. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *51*(6), 612-624. https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3089983.

11. Taylor, S. K., & Brown, A. M. (2023). Correlation analysis in human-computer interaction research: Methods and applications. *Computers & Graphics*, *112*, 45-58. https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.02.012.

12. MacKenzie, I. S., & Read, J. (2024). Empirical research methods for human-computer interaction. *arXiv preprint arXiv:2404.13319*. https://arxiv.org/html/2404.13319v1.

13. Hornbæk, K., & Oulasvirta, A. (2017). What is interaction? In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 5040-5052). ACM. https://doi.org/10.1145/3025453.3025765.

14. Kim, H. J., & Lee, S. W. (2021). Empirical studies on GUI element sizing and user performance. *Behaviour & Information Technology*, *40*(12), 1234-1249. https://doi.org/10.1080/0144929X.2021.1901293.

15. Anderson, R. P., Martinez, L., & Thompson, K. (2023). Human factors in software interface design: A quantitative approach. *Applied Ergonomics*, *108*, Article 103956. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.103956.

16. Martinez, C., & Davis, J. (2022). Statistical methods for usability evaluation in technical systems. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, *32*(4), 567-595. https://doi.org/10.1007/s11257-022-09325-8.

17. Antona, M., & Stephanidis, C. (2024). Usability and user experience evaluation in intelligent environments: A review and reappraisal. *International Journal of Human-Computer Studies*, *189*, 2829-2858. https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2394724.

18. ISO 9241-210:2019. (2019). *Ergonomics of human-system interaction – Human-centred design for interactive systems*. International Organization for Standardization.

19. Thompson, K. L., Garcia, E., & Wilson, M. (2021). Interface optimization through correlation analysis: Industrial case studies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *86*, Article 103215. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103215.

20. Chen, L., Wang, M., & Liu, H. (2023). Statistical modeling of user interface effectiveness: A systematic review. *International Journal of Human-Computer Studies*, *171*, Article 102978. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102978.

21. Національний технічний університет України "КПІ ім. Ігоря Сікорського". (2023). *Програмування інтерфейсів користувача: Силабус*. https://scs.kpi.ua/wp-content/uploads/silabys/2023-2024/МН/1/Програмування%20інтерфейсів%20користувача.pdf.

22. Шевченко, А. В., & Коваленко, І. М. (2024). Основні тренди UI/UX дизайну 2024 року. *Відкритий архів ХНУРЕ*. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/15a90510-29ff-4db3-96de-3567362a8bbb.

23. MacKenzie, I. S. (2024). hcidata: HCI Datasets. The Comprehensive R Archive Network (CRAN). https://cran.r-project.org/package=hcidata.

References

1. Wickens, C. D., & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3rd ed.). Prentice Hall.

2. Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates.

3. Norman, D. A. (2013). *The design of everyday things* (Rev. and expanded ed.). Basic Books.

4. Yang, J., Zhang, H., Li, F., Zou, X., Li, C., Gao, J., et al. (2024). UI-S1: Advancing GUI automation via semi-online reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:2509.11543*. https://arxiv.org/html/2509.11543.

5. Brooke, J. (1996). SUS: A quick and dirty usability scale. In P. W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, & A. L. McClelland (Eds.), *Usability evaluation in industry* (pp. 189-194). Taylor & Francis.

6. Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.

7. Benatti, A., Calandra, D., Lamberti, F., & Montuschi, P. (2024). Graphical user interface agents optimization for visual instruction grounding using multi-modal artificial intelligence systems. *arXiv preprint arXiv:2407.01558*. https://arxiv.org/html/2407.01558v1.

8. Zhang, J., & Johnson, K. A. (2022). Quantitative evaluation of GUI design patterns in enterprise applications. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, *29*(4), 1-28. https://doi.org/10.1145/3511047.3537640.

9. Latifzadeh, K., Gozalppour, N., Traver, V. J., Ruotsalo, T., Kawala-Sterniuk, A., & Leiva, L. A. (2024). Good GUIs, bad GUIs: Affective evaluation of graphical user interfaces. In *Proceedings of the 32nd ACM Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization* (pp. 185-195). ACM. https://doi.org/10.1145/3627043.3659549.

10. Rodriguez, M., & Singh, P. (2021). Performance metrics for GUI optimization in industrial systems. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *51*(6), 612-624. https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3089983.

11. Taylor, S. K., & Brown, A. M. (2023). Correlation analysis in human-computer interaction research: Methods and applications. *Computers & Graphics*, *112*, 45-58. https://doi.org/10.1016/j.cag.2023.02.012.

12. MacKenzie, I. S., & Read, J. (2024). Empirical research methods for human-computer interaction. *arXiv preprint arXiv:2404.13319*. https://arxiv.org/html/2404.13319v1.

13. Hornbæk, K., & Oulasvirta, A. (2017). What is interaction? In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 5040-5052). ACM. https://doi.org/10.1145/3025453.3025765.

14. Kim, H. J., & Lee, S. W. (2021). Empirical studies on GUI element sizing and user performance. *Behaviour & Information Technology*, *40*(12), 1234-1249. https://doi.org/10.1080/0144929X.2021.1901293.

15. Anderson, R. P., Martinez, L., & Thompson, K. (2023). Human factors in software interface design: A quantitative approach. *Applied Ergonomics*, *108*, Article 103956. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.103956.

16. Martinez, C., & Davis, J. (2022). Statistical methods for usability evaluation in technical systems. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, *32*(4), 567-595. https://doi.org/10.1007/s11257-022-09325-8.

17. Antona, M., & Stephanidis, C. (2024). Usability and user experience evaluation in intelligent environments: A review and reappraisal. *International Journal of Human-Computer Studies*, *189*, 2829-2858. https://doi.org/10.1080/10447318.2024.2394724.

18. ISO 9241-210:2019. (2019). *Ergonomics of human-system interaction – Human-centred design for interactive systems*. International Organization for Standardization.

19. Thompson, K. L., Garcia, E., & Wilson, M. (2021). Interface optimization through correlation analysis: Industrial case studies. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *86*, Article 103215. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103215.

20. Chen, L., Wang, M., & Liu, H. (2023). Statistical modeling of user interface effectiveness: A systematic review. *International Journal of Human-Computer Studies*, *171*, Article 102978. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102978.

21. Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy “KPI im. Ihoria Sikorskoho”. [National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”] (2023). *Prohramuvannia interfeisiv korystuvacha: Sylabus* [Programming user interfaces: Syllabus]. https://scs.kpi.ua/wp-content/uploads/silabys/2023-2024/MH/1/Програмування%20інтерфейсів%20користувача.pdf.

22. Shevchenko, A. V., & Kovalenko, I. M. (2024). Osnovni trendy UI/UX dyzainu 2024 roku [Main trends of UI/UX design in 2024]. *Vidkrytyi arkhiv KhNURE – Open Archive of KhNURE*. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/15a90510-29ff-4db3-96de-3567362a8bbb.

23. MacKenzie, I. S. (2024). hcidata: HCI Datasets. The Comprehensive R Archive Network (CRAN). https://cran.r-project.org/package=hcidata.

Отримано 20.09.2025

UDC 004.514.6

Oleh Ni[1], Oleksiy Piskarev[2], Yana Ni[3]

[1]PhD Student of Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: oleh.ni@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7748-5621

[2]PhD, Associate Professor, Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: oleksii.piskarev@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-6980-984X

[3]PhD, Associate Professor, Department of Electronic Computers
Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)
E-mail: yana.movsesian@nure.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1352-700X

CORRELATION ANALYSIS IN OPTIMIZATION OF THE ARCHITECTURE OF USER INTERFACES OF SOFTWARE SYSTEMS

This paper presents a systematic methodology for applying correlation analysis to optimize the architecture of graphical user interfaces (GUI) in software systems. The research addresses the gap in formalized quantitative approaches for evaluating the efficiency of UI design parameters and their impact on user performance in industrial and control systems. To address this limitation, a specialized simulation framework was developed to examine the relationships between GUI architectural parameters and operator performance indicators.

The simulation study utilized parameters of 30 virtual operators of technical systems with different expertise levels, based on secondary data from the hcidata (CRAN) database containing standardized HCI experimental results. The simulation design systematically varied button size (32×32 to 56×56 pixels), contrast ratios (2:1 to 7:1), font sizes (12-18 pt), and element spacing (4-16 pixels). Statistical analysis revealed strong correlations (|r| = 0.26-0.85) between interface parameters and performance metrics. In particular, modeling showed that increasing button size from 32×32 to 48×48 pixels reduced error rates by 42 % and decreased task completion time by 28 %. Enhancing contrast ratios from 3:1 to 4.5:1 lowered cognitive load by 18 %.

A predictive mathematical model – Interface Performance Efficiency (IPE) – was developed to estimate user performance based on key UI parameters. The model achieved cross-validated accuracy of 79,2 % and explained 74,3 % of variance, providing a theoretical basis for automated optimization of interface architectures in industrial applications. Differentiated recommendations were formulated for office systems, industrial HMI interfaces, and critical control environments.

The novelty of this research lies in integrating correlation-based quantitative analysis with human factors engineering through simulation modeling, enabling evidence-based theoretical guidelines for UI design. The practical significance is demonstrated by the economic analysis showing potential annual savings of 100,000-200,000 UAH for medium-sized enterprises through reduced errors and improved task efficiency, with an ROI of 300 % and a payback period of approximately 3 months. The simulation results provide a foundation for further empirical validation and practical implementation.

Keywords: *software architecture; graphical user interface; correlation analysis; system performance; UI optimization; human-computer interaction.*

Fig.: 4. Table: 3. References: 23.

Ні О. В., Піскарьов О. М., Ні Я. С. Кореляційний аналіз у оптимізації архітектури користувацьких інтерфейсів програмних систем. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 211-224. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-211-224.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-225-236
УДК 004.94:681.5

Петро Дмитрович Олексієнко[1], Володимир Вікторович Казимир[2]

[1]аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122
Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України (Київ, Україна)
E-mail: alexeenkop77@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-9588-9490

[2]доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

ПОДІЄВО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД У РЕАЛІЗАЦІЇ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РОЄМ БПЛА

У статті представлено результати експериментального дослідження подієво-орієнтованого підходу в реалізації вбудованих систем керування роєм БПЛА на основі керуючих Е-мереж (Control E-Networks). Перевірка ефективності проводиться шляхом порівняння запропонованої схеми керування на основі слухача подій із схемою циклічного опитування у серії експериментів: базове порівняння, багатоточковий аналіз, оцінка стабільності та аналіз алгоритмічної складності. Результати проведеного дослідження підтвердили суттєву перевагу подієво-орієнтованого підходу за основними цільовими та функціональними критеріями рою БПЛА: швидкістю реакції, стабільністю та ефективністю використання ресурсів.

Ключові слова: *рої БПЛА; керуючі Е-мережі; системи керування; подієво-орієнтоване керування; циклічне керування.*
Рис.: 6. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Сучасні мультиагентні системи, зокрема рої безпілотних літальних апаратів (БПЛА), вимагають швидкої, стабільної та енергоефективної обробки подій у режимі реального часу. Традиційні підходи до організації управління у вбудованих системах ґрунтуються на циклічному опитуванні, що забезпечує контроль за станом системи, але створює надмірне навантаження на процесор, знижує передбачуваність поведінки та обмежує масштабованість зі зростанням кількості агентів. Це суперечить сучасним тенденціям розвитку автономних технологій, де ключовими стають вимоги до безпеки, передбачуваності реакцій та мінімізації споживання енергії.

У цьому контексті актуальним є застосування подієво-орієнтованих підходів, які демонструють значні переваги у суміжних галузях – від подієво-тригерного керування в багатодронових системах [1] до використання подієвих датчиків у системах технічного зору [2]. Для галузі управління роями БПЛА така трансформація архітектури є критично важливою, оскільки дозволяє одночасно підвищити швидкість реакції, покращити надійність системи та знизити енергетичні витрати під час виконання довготривалих автономних місій.

Постановка проблеми. Попри значний прогрес у розвитку подієво-орієнтованих підходів, у практиці вбудованих систем керування досі переважає циклічний підхід. Він є простим у реалізації, однак має низку критичних недоліків. По-перше, постійне опитування призводить до значного навантаження на центральний процесор навіть у моменти, коли подій немає, що особливо проблематично для енергообмежених платформ БПЛА. По-друге, затримка реакції залежить від параметрів циклу та навантаження системи, що робить її непередбачуваною у критичних сценаріях, таких як уникнення зіткнень або аварійна посадка. По-третє, із зростанням кількості дронів у роєвій місії масштабованість системи деградує, оскільки складність зростає лінійно від часу очікування та кількості агентів [3].

Таким чином, існує проблема пошуку рішення, яке б поєднувало швидкість реакції, передбачуваність, ефективність використання ресурсів та здатність до масштабування. Подієво-орієнтований підхід на основі механізму слухача подій потенційно вирішує цю проблему, але потребує ґрунтовної кількісної перевірки на основі формальних моделей та експериментальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що за останні роки подієво-тригерне керування (event-triggered control – ETC) перейшло з вузьких застосувань у зрілу методологію ресурсоефективного керування. Оглядова стаття [4] систематизує сучасні

© П. Д. Олексієнко, В. В. Казимир, 2025

підходи до формування тригерів, проблематику запобігання явищу «Zeno» (накопичення нескінченної кількості спрацювань за скінченний час через зменшення міжподієвих інтервалів до нуля), спільне проєктування керування та планування передавання даних, а також підкреслює переваги ETC щодо скорочення частоти обчислень і обміну повідомленнями без втрати якості керування. Окремий огляд динамічних тригерів [5] детально розбирає схеми зі змінним порогом, що дозволяють відокремити частоту дискретизації вимірювань від частоти оновлення керуючих дій, підтримуючи гарантовану стабільність та зменшуючи кількість обчислень спостерігача/регулятора. Для багатоагентних систем релевантний огляд [6] показує, що подієві правила консенсусу знижують навантаження на мережу та процесор, водночас зберігаючи збіжність і стійкість до збурень – це безпосередньо важливо для роєвих сценаріїв.

У застосуванні до безпілотних літальних апаратів низка робіт демонструє практичні вигоди ETC на рівні задач місії. У [7] запропоновано подієво-тригерний контроль, розподілене управління з прогнозуючими моделями (Model Predictive Control – MPC) із гарантіями уникнення зіткнень у роєвих польотах: оновлення траєкторій та обмін даними між апаратами виконуються лише за подіями (порушення зон безпеки/обмежень), що різко скорочує обчислення та мережевий трафік без погіршення безпеки. Робота [1] розв’язує задачу стеження з наперед визначеним часом (prescribed-time tracking) для множини апаратів за обмежень стану; подієві правила визначають моменти оновлення керувальних впливів, забезпечується збіжність у заздалегідь призначений час (prescribed-time convergence), а кількість оновлень істотно менша, ніж у періодично активованих підходах (time-triggered). Паралельно активно розвивається подієве сприйняття. Великий огляд з візуалізацією на основі подій [8] узагальнює властивості сенсорів змін яскравості (мікросекундні латентності, широкий діапазон освітленості, дуже низьке енергоспоживання) та демонструє їх синергію з реактивними контурами керування. Нещодавні системні роботи фокусуються на трактах обробки подій із малою затримкою: у [9] запропоновано масштабовану потокову обробку подієвого відео з мінімізацією затримок у каналі «сенсор → обчислення», а [10] показує приклад керування квадрокоптером у геометрично складному каналі (вузька труба) на основі подієвої велосиметрії – що підкреслює практичну важливість реактивної обробки для високодинамічних маневрів.

На рівні системного програмування класичні результати [11] пояснюють, коли активне опитування може переважати переривання за пропускною здатністю (наприклад, високошвидкісне введення-виведення без частих контекстних перемикань), а сучасні дослідження енергетики показують сценарії, де активне опитування має нижчі витрати енергії за умови виділеного ядра та великих черг NVMe (Non-Volatile Memory Express) [12]. Ці роботи важливі як контрприклади: вони вказують, що перевага реактивності не є «безумовною» і залежить від конкретної архітектури виконання – отже, потрібні предметні порівняльні експерименти для конкретних шаблонів очікування подій.

Як формальний апарат опису і реалізації алгоритмів керування БПЛА використовуються керуючі E-мережі (Control E-Networks – CEN) [3], які вдало використовуються для моделювання систем інтернету речей та здатні однаково природно описувати як циклічні, так і подієві процеси керування, включно з синхронізацією потоків подій. Це робить CEN універсальним засобом реалізації схем керування різних типів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у подієво-тригерному керуванні, бракує порівнянь схем реакції на події у вбудованих системах, а саме циклічного опитування (polling), або використання подієвих слухачів (reactive), що відтворюються експериментально під час реального виконання, а не лише у моделюванні чи на рівні законів керування. Існуючі огляди ETC та динамічних тригерів тільки узагаль-

нюють правила активації та гарантії стабільності [4-6], але не розглядають виконавчі шаблони (polling/interrupt/reactive) та їхні ресурсні наслідки у вбудованих керувачах загального призначення. Тож не з'ясованими лишаються такі питання, як:

1) *Відсутність прямих порівнянь під час виконання «циклічного» та «подієвого» підходів за тотожних сценаріїв.* Прикладні роботи для БПЛА зосереджуються на розподіленому МРС або спеціальних законах керування (уникнення зіткнень, координація, стеження з наперед визначеним часом) і оцінюють частоту оновлень та якість траєкторій, але не розкладають цей ефект на алгоритмічну ціну очікування події у коді контролера (кількість перевірок, середній/піковий рівень завантаження процесора, блокувальне/неблокувальне виконання) [7; 1]. Це залишає відкритим питання: що саме дає виграш – закон керування чи спосіб очікування події під час виконання.

2) *Стабільність та передбачуваність часу реакції у серіях повторів.* Огляди зосереджені на теоретичних межах, асимптотиках та збіжності, тоді як варіативність (міжквартильний розмах, показники найгіршого випадку) для різних схем очікування в публікаціях майже не вимірюється експериментально на вбудованих платформах [4; 6]. Для задач безпеки (уникнення зіткнень, аварійні режими) це критично.

3) *Експериментальна перевірка поведінки очікування подій.* У більшості робіт увага зосереджена на правилах активації (коли «оновлювати»), а прямі вимірювання реальної поведінки механізмів очікування трапляються нечасто [4; 5].

4) *Профілі використання ресурсів та енергоспоживання за різних тривалостей очікування.* Роботи з подієвого сприйняття показують вигоди сенсорного тракту (мікросекундні затримки, низьке споживання) [8-10], однак досі бракує комплексного вимірювання роботи керувача для коректного порівняння «циклічного» та «подієвого» підходів у тих самих завданнях. Системні праці про компроміс між опитуванням і перериваннями демонструють контрприклади для високошвидкісного введення-виведення [11; 12], але ці результати не перенесено на керування польотом і роєву координацію.

5) *Зв'язок формальних моделей та виконання.* Попри наявність формальної бази CEN для опису як циклічних, так і подієвих процесів із J/Y-синхронізацією [3], у наявних роботах майже відсутні зв'язки між формальними мережевими моделями та емпіричними метриками виконання (затримка реакції, стабільність, ресурсні витрати) в експериментах із відтворюваними результатами.

У підсумку, потребує заповнення прогалина, де та сама функціональна логіка керування тестується у двох схемах очікування (циклічна і подієва) – прямими вимірами стабільності реакції, масштабуванням щодо часу очікування та (за можливості) кількості агентів, емпіричною перевіркою асимптотичної складності, повним ресурсним профілем і узгодженням із формальною моделлю CEN. Саме цю прогалину заповнює ця робота, пропонуючи відтворювану постановку експерименту та показники, що безпосередньо порівнюють архітектури очікування подій.

Метою статті є експериментально й кількісно довести переваги подієво-орієнтованого підходу на основі слухачів порівняно з циклічним опитуванням у вбудованих системах керування роєм безпілотних літальних апаратів у формалізмі CEN.

У процесі дослідження вирішували такі завдання:

1. Спроєктувати два функціонально еквівалентні сценарії (циклічний та подієвий) у CEN та реалізувати відтворювані тести.
2. Провести базове порівняльне вимірювання за фіксованого часу очікування та зафіксувати ключові метрики (час реакції, процесорне навантаження, пам'ять, кількість операцій).
3. Виконати багатоточковий аналіз у діапазоні часових затримок (0,1-15 с) для виявлення трендів і масштабування.

4. Оцінити стабільність часу реакції (розкид, міжквартильний розмах (IQR), найгірший випадок) у серіях повторних запусків.

5. Перевірити алгоритмічну складність очікування події для циклічного та подієвого підходів.

6. Узагальнити результати у вигляді таблиць і графіків та сформулювати рекомендації до вибору схеми для ройових застосувань.

Виклад основного матеріалу.

Опис сценарію керування засобами CEN.

Керування роєм БПЛА – це фактично інтелектуальна обробка потоку подій, що містить аналіз повідомлень від інших агентів, фіксація досягнення контрольних позицій, реагування на екстрені сигнали сенсорів, врахування обмежень енергоживлення (наприклад, рівень заряду батареї). Реакція на такі події має бути майже миттєвою, інакше виникає затримка, яка безпосередньо впливає на безпеку та виконання місії. Своєю чергою, керуючі Е-мережі є різновидом мереж Петрі і дозволяють моделювати як послідовні, так і паралельні взаємодіючі процеси з урахуванням умов їх виконання. Тож їх використання як формального апарату для реалізації алгоритмів керування роєм БПЛА є очікуваним і практично доцільним.

Щоб виокремити вплив схеми опрацювання подій, а не законів керування чи інших компонентів, розглянемо типовий мікросценарій: якщо з'являються певні дані, то дозволяється перейти до наступної дії. Це відповідає, наприклад, ситуації, коли ціль розпізнана за даними відеокамери: поки події немає, активація наступних обчислень не має сенсу. Така локальна декомпозиція легко представляється в CEN: мережа дозволяє взяти невеликий фрагмент загальної моделі та дослідити його поведінку незалежно; масштабування решти системи (інші гілки, інші потоки) не змінює локальну семантику очікування.

При використанні CEN за традиційною схемою очікування події реалізується через цикл опитування глобальної змінної: процес регулярно перевіряє, чи настав потрібний стан, і лише тоді переходить далі. Це просто в реалізації, але створює зайві обчислення та додає певну затримку. На рис. 1 наведено фрагмент алгоритму керування, що реалізує циклічну схему реагування на подію (polling), представлений у вигляді дводольного графа з'єднаних позицій (P) та переходів (T, X, Y). Після ініціалізації (перехід T1) процес входить у цикл із мінімальною паузою (перехід T3), де перехід X1 перевіряє глобальну змінну: якщо умова істинна – потік іде до «успішної» гілки P4–T2–P5, інакше – повертається в черговий оберт.

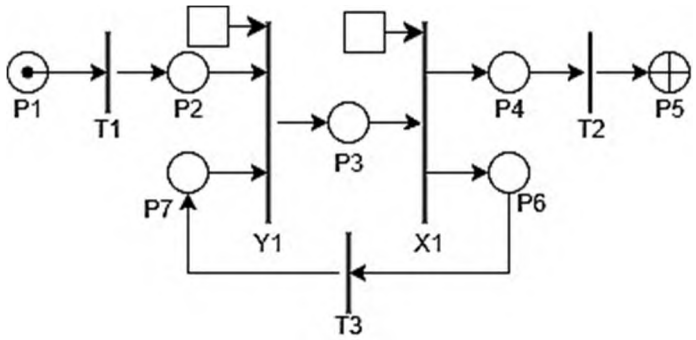


Рис. 1. Схема циклічного CEN-фрагмента очікування події (polling)

На рис. 2 показано реактивний фрагмент (reactive): після ініціалізації (T1) використовується перехід J1, що не блокує інші гілки та спрацьовує лише за наявності токенів на всіх своїх входах.

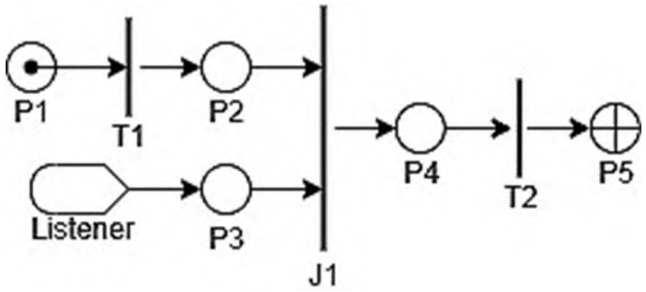


Рис. 2. Схема реактивного CEN-фрагмента зі слухачем та переходом J (reactive)

Токен від слухача подій заноситься в P3; як тільки він з'являється, виконується локальна перевірка умови спрацьовування J1. Важлива особливість нашої реалізації CEN: тут немає періодичного опитування; перевірка тригера J відбувається виключно в момент надходження токена до будь-якої вхідної позиції. Тому навіть для J із двома входами достатньо однієї перевірки: перший токен «позначає готовність» частини передумов, а під час появи другого відбувається єдина перевірка, після якої перехід миттєво спрацьовує. Це передає сутність подієво-орієнтованого підходу – відсутність циклів очікування.

Середовище виконання та відтворюваність.

Як апаратна платформа для реалізації алгоритму керування БПЛА у складі рою використовувався додатковий мікрокомп'ютер Jetson Nano, на якому можна відтворити паралельне виконання процесів реагування, планування та зв'язку, притаманних агентові у складі мультиагентної системи. Програмна реалізація алгоритму керування, представленого у вигляді CEN, здійснювалась мовою Python 3.8.

Для зіставлення результатів натурних експериментів обидва сценарії (циклічний та реактивний) запускалися в окремих процесах (*subprocess*), а вимірювання виконувалися засобами psutil та високоточними таймерами (*time.perf_counter*). Фіксувалися час реакції, кількість операцій очікування (кількість повторів циклу або спрацьовування J переходу), профіль навантаження ЦП, RSS-пам'ять. RSS-пам'ять (Resident Set Size) – обсяг фізичної оперативної пам'яті, що фактично зайнятий процесом. На відміну від віртуальної пам'яті (VMS), RSS показує реальне споживання системних ресурсів.

Між запусками коду реалізації CEN встановлювалися короткі стабілізаційні паузи для згладжування фонового шуму. Крім цього, CEN-реалізацію було доповнено збиранням додаткової статистики: фіксувався час виникнення події (появи токенів у вхідних позиціях), кількість спрацювань переходу X у циклі, кількість спрацьовувань переходу J, кількість згенерованих/спожитих токенів і службові події. Усі ці дані зберігалися у JSON-логах та агрегувалися скриптами для побудови графіків, що забезпечувало наочне представлення результатів.

Експеримент 1. За фіксованого часу очікування.

Після реалізації двох наведених вище рівнофункціональних фрагментів схем керування (див. рис. 1-2) перевіряли, наскільки схема очікування впливає на поведінку керувача. Під час запуску обох реалізацій Jetson Nano у відокремлених процесах вимірювали:

- час реакції (мс) – прямий показник безпеки та здатності системи реагувати в реальному часі;
- середнє навантаження процесора (%) – за профілем навантаження;
- кількість операцій очікування (повтори циклу або одиничне спрацьовування переходу J), що може розглядатися як наближена оцінка алгоритмічної складності;
- RSS-пам'ять (МБ) – щоб перевірити, що виграш досягається не ціною додаткової постійної пам'яті.

Результати базового порівняння циклічної та подієво-орієнтованої схем керування за фіксованого часу проведення експерименту наведено на рис. 3. Реактивна реалізація показує у 183 рази менший час реакції (8,301 мс проти 0,045 мс), у 235 разів нижчу середню завантаженість ЦП (22,97 % → 0,098 %), зменшення кількості операцій очікування у 21 раз (21 перевірка в циклі проти одного спрацювання переходу J), використання пам'яті – без суттєвих відмінностей (приблизна 20 та 21 МБ). Це підтверджує висунуту гіпотезу, що відмова від циклу прибирає зайві обчислення та пов'язану з ними затримку.

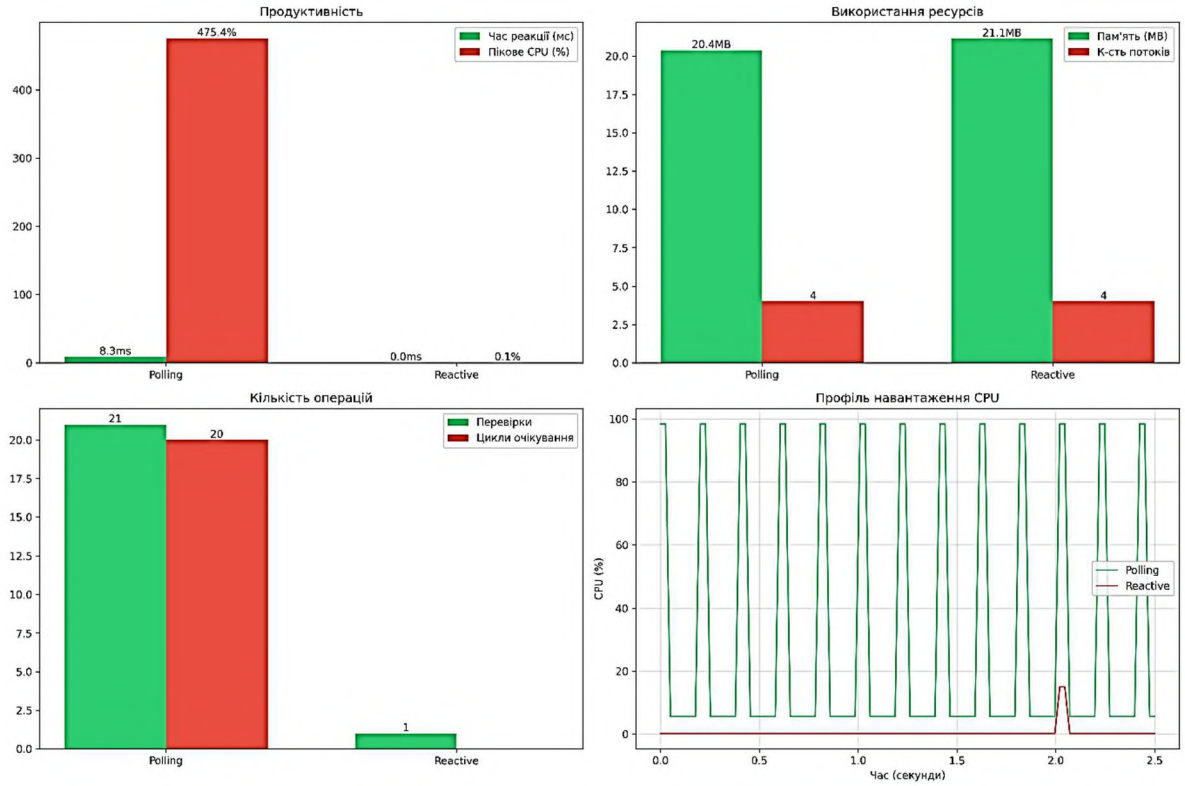


Рис. 3. Результати порівняння за фіксованого часу очікування

Експеримент 2. За змінного часу очікування.

Ідея експерименту полягає у дослідженні того, як змінюється поведінка обох схем керування зі зростанням інтервалу очікування. Це важливо для ройових місій різної тривалості та для подій із рідкісною появою. Проводили вимірювання у 20 точках діапазону часу очікування 0,1-15 с; кожна точка – окремий процес зі стабілізаційними паузами. Оцінювали:

- Час реакції – наскільки швидко система відповідає на подію. Критично для безпеки дронів.
- Навантаження процесора – скільки ресурсу процесора споживає система. Впливає на енергію батареї та час польоту.
- Кількість перевірок – скільки операцій виконує система. Циклічний підхід робить багато перевірок (циклічно кожні 0,1 с), а подієвий – лише одну на подію.
- RSS-пам'ять – скільки фізичної пам'яті використовує процес. Важливо для обмежених ресурсів дронів.

З рис. 4 видно, що крива подієвої реалізації (reactive) практично пласка, тоді як у циклічної (polling) вона зростає разом із часом очікування. Подієва реалізація стабільно швидка (≈ 0,00005 с), а циклічна повільніша та погіршується з часом (від 0,0004 с до 0,074 с). Середня перевага подієвого підходу: 756 разів. Середня навантаженість ЦП у подієвого підходу нижча приблизно у 157 разів. Графік залежності кількості перевірок

від часу очікування для циклічного підходу лінійний, що відповідає принципу: що довше очікування, то більше операцій O(n*t/Δt), де n = 1 (однорівневий цикл), t – заданий час очікування, Δt – крок циклу опитування (≈ 0,1 с), далі використовуємо скорочення O(t/Δt); для подієвого підходу кількість операцій – константа (= 1), то алгоритмічна складність схеми керування дорівнює O(1).

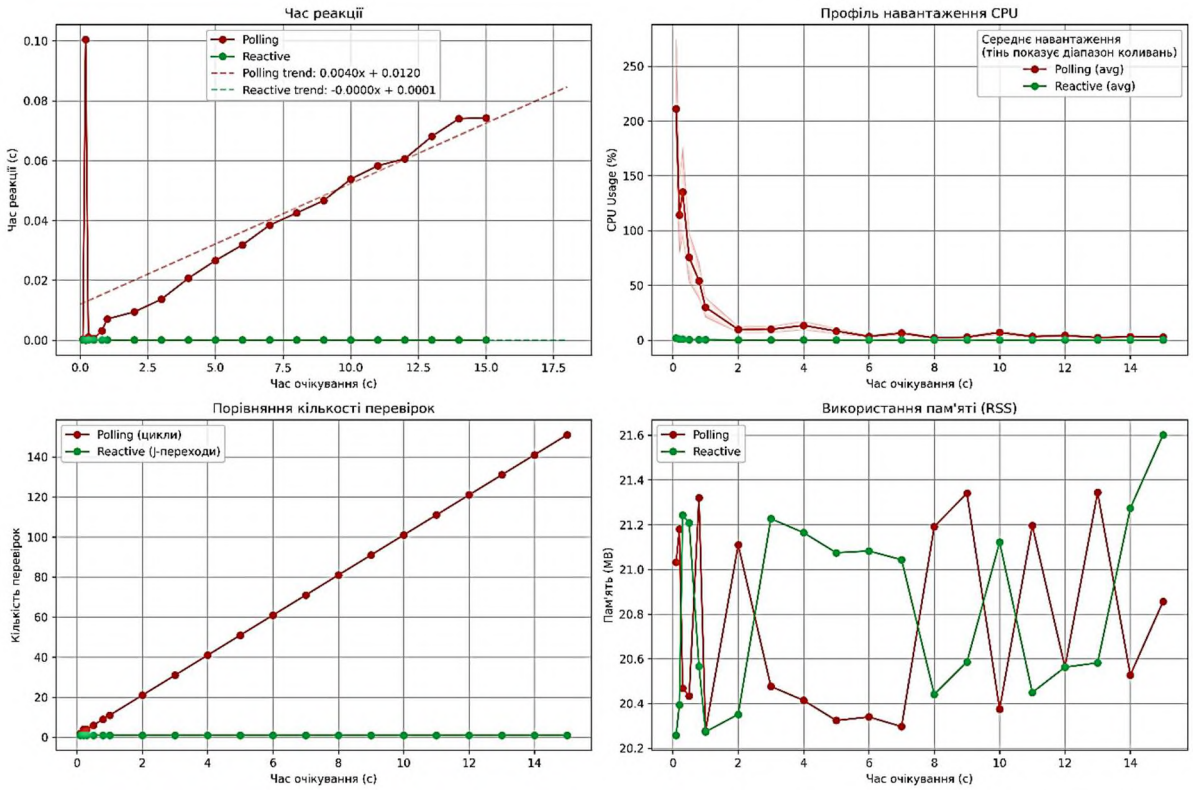


Рис. 4. Результати порівняння за змінного часу очікування

Експеримент 3. Стабільність часу реакції.

Надійність ройового керування визначається не лише середнім часом відгуку, а й стабільністю цього відгуку в умовах фонового навантаження. Нестабільність виникає через недетермінованість виконання на борту (планувальник ОС, переривання, конкуренція за процесор з процесами сприйняття та зв'язку, кеш-ефекти, енергозбереження, збірка сміття в Python). У циклічному підході постійні перевірки додатково завантажують ядра, підсилюючи варіативність; подієва обробка, навпаки, усуває холості обчислення.

Щоб кількісно оцінити стабільність, ми 30 разів повторили вимірювання часу реакції для кожної схеми на одному й тому самому таймінгу (~ 2 с). Спершу розглядали зведені графіки розподілу значень – вони показують, де зосереджена більшість вимірів і чи трапляються поодинокі дуже великі або дуже малі значення. Далі використовували такі показники:

- Міжквартильний розмах (IQR). Це ширина «середньої половини» вимірів: від значення, нижче якого лежить 25 % усіх вимірів (25-й процентиль), до значення, нижче якого лежить 75 % вимірів (75-й процентиль). Чим менший IQR, тим менша типова мінливість між запусками, тобто система стабільніша.
- Діапазон (макс − мін) – груба оцінка розкиду в найгіршому випадку, чутлива до поодиноких довгих затримок;
- Тест Левена. Статистична перевірка того, чи однаковий розкид значень у двох групах (циклічний та подієвий підходи). Мале значення p означає, що розкиди дійсно різні.

- Перекіс у бік великих затримок. Додатково якісно оцінювали, чи не з’являються рідкісні, але дуже великі затримки частіше в однієї зі схем; це видно на графіках як поява поодиноких великих значень праворуч шкали.

Як показано на рис. 5, реактивний підхід має у 19 разів вужчий діапазон і у 11 разів менший IQR, ніж циклічний; тест Левена дає $p \approx 1{,}6 \cdot 10^{-8}$, тобто різниця дисперсій двох розподілів часу реакції статистично значуща. Інакше кажучи, подієві J-переходи не лише пришвидшують реакцію, а й зменшують випадкові коливання часу затримки, що критично для усунення ситуацій найгіршого випадку. Практично це означає суттєво менший ризик поодиноких великих затримок, що безпосередньо впливає на надійність уникнення зіткнень і відпрацювання екстрених команд у рої.

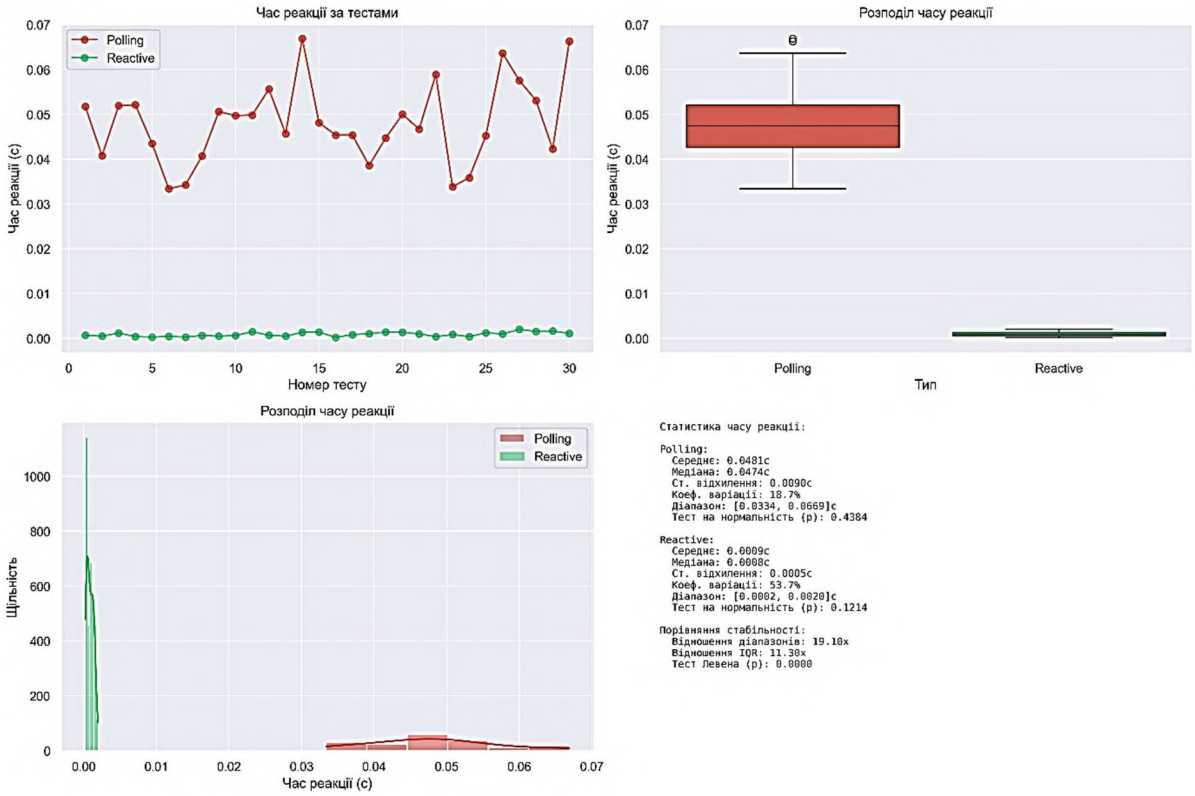


Рис. 5. Порівняння стабільності часу реакції для циклічного та реактивного підходів

Експеримент 4. Експериментальна перевірка алгоритмічної складності очікування.

Мета цього експерименту – з’ясувати, скільки саме операцій очікування виконує кожен підхід залежно від тривалості очікування події. Відповідно до результатів експерименту 1, для циклічного підходу очікуємо $O(t/\Delta t)$ (цикл встигає зробити $t/\Delta t$ перевірок), для подієвого – $O(1)$ (подія ініціює єдине спрацювання J). Вимірювали кількість перевірок (для циклу) або одиничні спрацювання J (для подієвого) як безпосередню оцінку алгоритмічної складності; додатково аналізували залежність часу реакції від часу очікування на предмет залежності від t.

Результати (рис. 6) відповідають очікуванню. Для циклічного підходу отримано майже ідеальну лінійну залежність між числом перевірок і часом очікування: $R^2 \approx 0{,}9999$, нахил $\approx 9{,}7^{-10}$ перевірок/с, що узгоджується з $\Delta t \approx 0{,}1$ с і означає $O(t/\Delta t)$. Для подієвого підходу кількість операцій у всіх точках дорівнює 1, тобто $O(1)$; при цьому час реакції практично не залежить від t.

Цей експеримент дає емпіричне пояснення тому, що ми спостерігали раніше: у циклічному підході з ростом t зростає число перевірок, відповідно – навантаження на процесор і затримка; у реактивному підході вони залишаються сталими, тому виграш за часом реакції та за ресурсами зростає разом із тривалістю очікування.

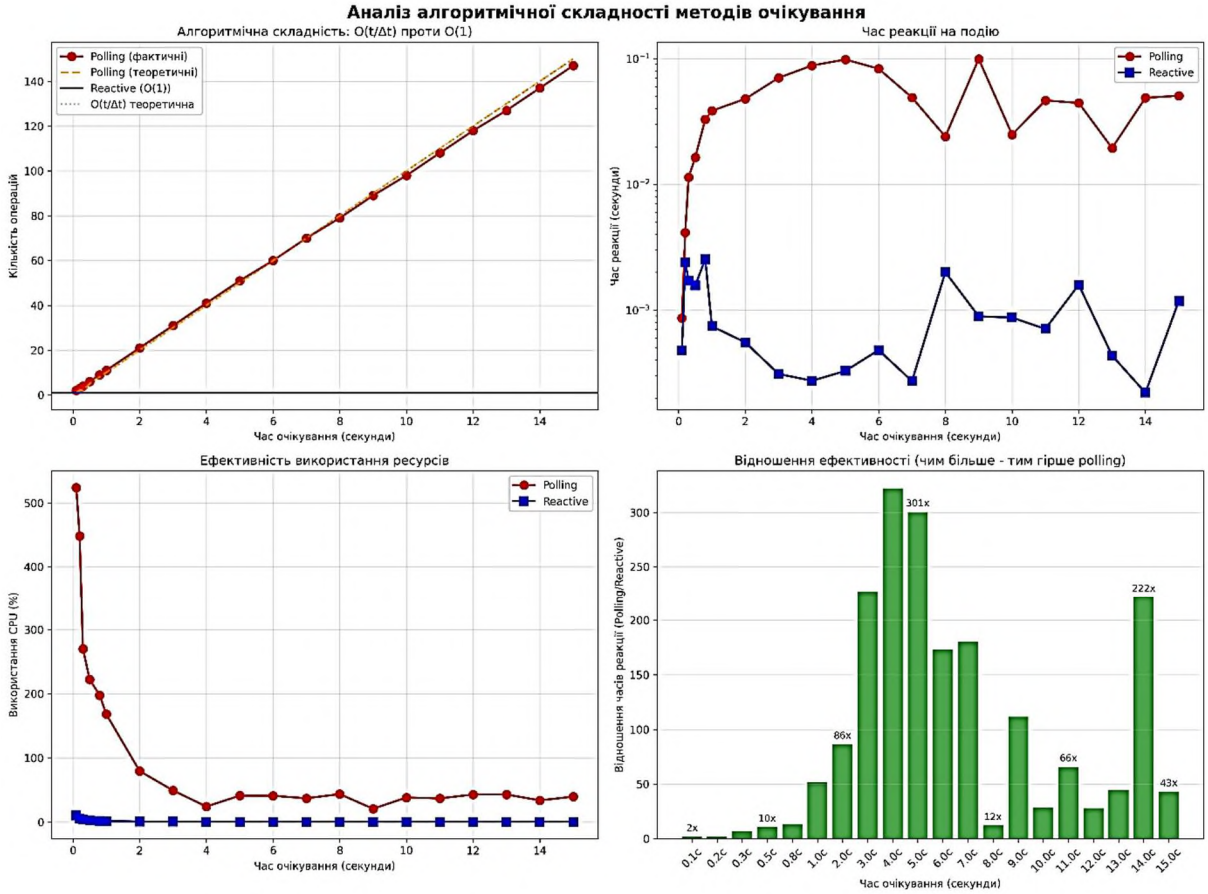


Рис. 6. Результати перевірки поведінки очікування події та кількості операцій

Висновки. У роботі представлено реалізацію подієво-орієнтованої схеми керування БПЛА у складі рою та її порівняння зі схемою циклічного керування.

Порівняння виконано на рівнофункціональних фрагментах алгоритмів керування, формалізованих за допомогою CEN та реалізованих мовою Python у відокремлених процесах на апаратній платформі Jetson Nano.

Проведені натурні експерименти дали змогу оцінити внесок схем керування у швидкодію, стабільність і ресурсні витрати без домішок інших чинників.

Отримані результати демонструють, що відмова від циклів опитування на користь слухачів та J-переходів CEN істотно покращує часові характеристики та профіль навантаження. За фіксованого часу подієва реалізація забезпечує приблизно у 183 рази менший час реакції і у 235 разів нижчий середній рівень навантаження процесора, при цьому кількість операцій очікування зменшується у 21 раз. У багатоточковому порівнянні на змінному діапазоні часу затримки 0,1-15 с зберігається та сама тенденція: затримка подієвої схеми практично не залежить від інтервалу очікування, тоді як затримка циклічної схеми деградує зі зростанням цього інтервалу; співвідношення часу реакції (циклічна/подієва реалізація) має медіанне значення близько 719, середнє – 756, максимальне – 2 539; середнє завантаження процесора для подієвого підходу нижче орієнтовно у 157 разів.

Не менш важливою є передбачуваність поведінки. Серії повторних запусків за однакових умов засвідчили помітне зменшення варіативності для подієвого підходу: діапазон значень часу реакції вужчий приблизно у 19 разів, міжквартильний розмах – у 11 разів; відмінність дисперсій статистично значуща ($p \approx 1{,}6 \cdot 10^{-8}$). Таким чином, реагування не лише пришвидшується, а й стає стабільнішим у типових і найгірших ситуаціях, що є важливим для критичних сценаріїв у рої.

Аналіз алгоритмічної складності пояснює спостережувані виграші: для циклів опитування кількість перевірок зростає пропорційно часу очікування з майже ідеальною лінійністю, тоді як для подієвої реалізації залишається сталою. Ця різниця безпосередньо відбивається на затримці та енергоспоживанні, особливо в умовах багатозадачності на борту.

Практичний висновок для вбудованих систем керування роями полягає в доцільності впровадження подієвої схеми керування як стандартної у всіх випадках, де домінує очікування зовнішніх або внутрішніх подій (надходження повідомлень від інших агентів, підтвердження досягнення позиції, екстрені команди, сигнали обмежень і станів енергоживлення). Це дозволяє одночасно зменшити затримку та коливання затримки, знизити середні та пікові витрати процесорного часу і, як наслідок, покращити енергоефективність та масштабованість під час виконання довготривалих місій. Використання циклічного опитування може бути виправданим у вузьких високошвидкісних підсистемах введення-виведення, де експериментально доведено кращу пропускну здатність або енергетичний профіль. Але й у таких випадках доцільні гібридні схеми з локальним циклічним опитуванням у поєднанні з подієвою координацією.

Сформульовані висновки спираються на узгоджені результати чотирьох незалежних серій експериментів і відтворювану методику вимірювань, що підвищує їхню достовірність. Водночас межі зовнішньої валідності визначаються вибраною платформою (Jetson Nano) та програмним середовищем Python 3.8; перенесення на інші апаратні платформи є предметом подальших досліджень. Перспективні напрями подальших досліджень: інтеграція подієвої архітектури з розподіленими протоколами взаємодії в роєвих системах та енергометрія на рівні апаратної платформи для прогнозування тривалості виконання місії.

Список використаних джерел

1. Han, X., Yu, P., Lv, M., Shi, Y., & Wang, N. (2025). Event-driven prescribed-time tracking control for multiple UAVs with flight state constraints. *Machines, 13*(3), 192. https://doi.org/ 10.3390/machines13030192.

2. Vitale, A., Renner, A., Nauer, C., Scaramuzza, D., & Sandamirskaya, Y. (2021, May). Event-driven vision and control for UAVs on a neuromorphic chip. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 103-109). IEEE. https://arxiv.org/abs/2108.03694.

3. Kazymyr, V., Pasko, O., Usik, A., & Sydorenko, D. (2019). New paradigm of model-oriented control in IoT. In R. Damaševičius & G. Vasiljevienė (Eds.), *Information and software technologies: ICIST 2019* (*Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1078). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30275-7_46.

4. Zhang, X.-M., Han, Q.-L., Ge, X.-H., *et al.* (2025). An overview of recent advances in event-triggered control. *Science China Information Sciences, 68*(6), 161201. https://doi.org/10.1007/s11432-024-4437-9.

5. Ge, X., Han, Q.-L., & Dong, H. (2021). Dynamic event-triggered control and estimation: A survey. *International Journal of Automation and Computing, 18*, 1294-1316. https://doi.org/10.1007/s11633-021-1306-z.

6. Liu, W., Zhang, B., & Jiang, H. (2024). A review of event-triggered consensus control in multi-agent systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* https://doi.org/10.1080/23307706.2024.2388551.

7. Gräfe, A., Eickhoff, J., & Trimpe, S. (2022). *Event-triggered and distributed model predictive control for guaranteed collision avoidance in UAV swarms*. *arXiv preprint* arXiv:2206.11020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.11020.

8. Gallego, G., Delbrück, T., Orchard, G., Bartolozzi, C., Taba, B., Censi, A., … Liu, S.-C. (2022). Event-based vision: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44*(1), 154-180. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3008413.

9. Hamara, A., Kilpatrick, B., Baratta, A., Kofink, B., & Freeman, A. C. (2024). Low-latency scalable streaming for event-based vision. *arXiv preprint arXiv:2412.07889*. https://arxiv.org/abs/2412.07889.

10. Bauersfeld, L., & Scaramuzza, D. (2025). Low-latency event-based velocimetry for quadrotor control in a narrow pipe. *arXiv preprint*, arXiv:2507.15444. https://arxiv.org/abs/2507.15444.

11. Yang, J., Minturn, D. B., & Hady, F. (2012, February). When poll is better than interrupt. In *Proceedings of the 10th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST '12)*. San Jose, CA, USA: USENIX Association. Retrieved from https://www.usenix.org/conference/fast12/when-poll-better-interrupt.

12. Harris, B., & Altiparmak, N. (2022, July). When poll is more energy efficient than interrupt. In *Proceedings of the 14th ACM Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems (HotStorage '22)* (pp. 59-64). New York, NY: Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3538643.3539747.

References

1. Han, X., Yu, P., Lv, M., Shi, Y., & Wang, N. (2025). Event-driven prescribed-time tracking control for multiple UAVs with flight state constraints. *Machines, 13*(3), 192. https://doi.org/ 10.3390/machines13030192.

2. Vitale, A., Renner, A., Nauer, C., Scaramuzza, D., & Sandamirskaya, Y. (2021, May). Event-driven vision and control for UAVs on a neuromorphic chip. In *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 103-109). IEEE. https://arxiv.org/abs/2108.03694.

3. Kazymyr, V., Pasko, O., Usik, A., & Sydorenko, D. (2019). New paradigm of model-oriented control in IoT. In R. Damaševičius & G. Vasiljevienė (Eds.), *Information and software technologies: ICIST 2019* (*Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1078). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-30275-7_46.

4. Zhang, X.-M., Han, Q.-L., Ge, X.-H., *et al.* (2025). An overview of recent advances in event-triggered control. *Science China Information Sciences, 68*(6), 161201. https://doi.org/10.1007/s11432-024-4437-9.

5. Ge, X., Han, Q.-L., & Dong, H. (2021). Dynamic event-triggered control and estimation: A survey. *International Journal of Automation and Computing, 18*, 1294-1316. https://doi.org/10.1007/s11633-021-1306-z.

6. Liu, W., Zhang, B., & Jiang, H. (2024). A review of event-triggered consensus control in multi-agent systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* https://doi.org/10.1080/23307706.2024.2388551.

7. Gräfe, A., Eickhoff, J., & Trimpe, S. (2022). *Event-triggered and distributed model predictive control for guaranteed collision avoidance in UAV swarms*. *arXiv preprint* arXiv:2206.11020. https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.11020.

8. Gallego, G., Delbrück, T., Orchard, G., Bartolozzi, C., Taba, B., Censi, A., … Liu, S.-C. (2022). Event-based vision: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 44*(1), 154-180. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2020.3008413.

9. Hamara, A., Kilpatrick, B., Baratta, A., Kofink, B., & Freeman, A. C. (2024). Low-latency scalable streaming for event-based vision. *arXiv preprint arXiv:2412.07889*. https://arxiv.org/abs/2412.07889.

10. Bauersfeld, L., & Scaramuzza, D. (2025). Low-latency event-based velocimetry for quadrotor control in a narrow pipe. *arXiv preprint*, arXiv:2507.15444. https://arxiv.org/abs/2507.15444.

11. Yang, J., Minturn, D. B., & Hady, F. (2012, February). When poll is better than interrupt. In *Proceedings of the 10th USENIX Conference on File and Storage Technologies (FAST '12)*. San Jose, CA, USA: USENIX Association. Retrieved from https://www.usenix.org/conference/fast12/when-poll-better-interrupt.

12. Harris, B., & Altiparmak, N. (2022, July). When poll is more energy efficient than interrupt. In *Proceedings of the 14th ACM Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems (HotStorage '22)* (pp. 59-64). New York, NY: Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3538643.3539747.

Отримано 19.09.2025

UDC 004.94:681.5

Petro Oleksiienko[1], Volodymyr Kazymyr[2]

[1]PhD Student, Recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science (Kyiv, Ukraine)
E-mail: alexeenkop77@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0009-9588-9490

[2]Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

EVENT-ORIENTED APPROACH IN THE IMPLEMENTATION OF EMBEDDED UAV SWARM CONTROL SYSTEMS

This paper presents an experimental, reproducible study of an event-driven (listener-based) approach for embedded control in drone swarms, contrasted with the classical cyclic polling used to monitor system states. Cyclic checks increase processor load, waste energy, and degrade scalability as agent count or mission time grows. To isolate the effect of the waiting mechanism itself (rather than a control law), both realizations are modeled in the Control E-Networks (CEN) formalism as functionally equivalent fragments with identical "wait for event → continue" logic.

Implementations ran on a Jetson Nano using Python 3.8. Each scenario executed in a separate process (subprocess isolation). The CEN runtime was instrumented with counters and time stamps (token arrivals, checks, J-firings); measurements used high-resolution timers and psutil. We recorded reaction time, number of waiting operations (polling checks vs. a single J-transition), average/peak CPU load, and RSS memory, storing raw JSON logs for verification.

We conducted four complementary experiments. First, a fixed-timing baseline contrasted latency, CPU load, waiting operations, and memory under identical conditions. Second, a multi-point study (0,1-15 s) examined how latency and CPU scale with longer waiting intervals and how the count of polling checks grows, while the event-driven variant remains event-triggered. Third, a repeatability study with multiple runs assessed predictability via the spread of reaction times and variance comparison. Fourth, an empirical examination of waiting behavior related the number of operations to the waiting interval and observed the corresponding trend in reaction time. Across all experiments, the event-driven realization consistently delivered markedly lower latency and CPU usage, fewer waiting operations, and tighter variability, whereas polling degraded as the waiting interval increased.

These findings show that replacing cyclic waiting with listener-based, event-driven execution in CEN improves responsiveness, resource efficiency, and predictability–properties essential for collision avoidance, emergency handling, waypoint confirmation, and long-duration missions under resource contention. Practically, event-driven mechanisms should be preferred in branches dominated by waiting for external or internal events, while cyclic polling may remain justified only in narrow high-throughput I/O subsystems where its advantage is demonstrated.

Keywords: *UAV swarms; multi-agent systems; Control E-Networks; control systems; event-driven control; listeners; cyclic polling.*

Fig.: 6. References: 12.

Олексієнко П. Д., Казимир В. В. Подієво-орієнтований підхід у реалізації вбудованих систем керування роєм бпла. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 225-236. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-225-236.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES
DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-237-253
УДК 004.2

Юрій Іванович Підлісний
аспірант кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: ypodlesny@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-9783-3898. **ResearcherID:** LSL-1170-2024

НЕЧІТКА ЛОГІКА В ОЦІНЮВАННІ РИЗИКІВ БЕЗПЕКИ IoT: ПОБУДОВА ПРАВИЛ І РЕАЛІЗАЦІЯ

У статті запропоновано нову модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки в середовищі Інтернету речей (IoT), яка базується на методах нечіткої логіки типу Mamdani. З метою підвищення точності аналізу ризиків враховано не лише технічні характеристики пристроїв, а й контекст їхнього функціонування – зокрема рівень критичності функцій, вразливість та захищеність каналів зв'язку. Розроблена модель реалізована у MATLAB з використанням Fuzzy Logic Toolbox. Проведено моделювання фрагмента гетерогенної IoT-мережі та виконано візуалізацію результатів. Отримані результати порівняно з традиційною методологією EBIOS, що дозволило виявити переваги запропонованого підходу, зокрема плавність переходів між рівнями ризику та кращу адаптивність до змін контексту. Запропонована модель може бути використана для автоматизованого аналізу ризиків у динамічних і критичних IoT-системах.

Ключові слова: *Інтернет речей; оцінювання ризиків; нечітка логіка; Fuzzy Logic Toolbox; Mamdani; інформаційна безпека; EBIOS.*
Рис. 5. Бібл.: 16. Табл.: 3.

Актуальність теми дослідження. Інтернет речей (Internet of Things, IoT) стрімко трансформує сучасний цифровий ландшафт, забезпечуючи взаємодію мільярдів пристроїв у різних сферах – від розумного дому й медицини до промисловості та критичної інфраструктури. За прогнозами аналітичних агентств, до 2030 року кількість підключених IoT-пристроїв перевищить 25 млрд, що створює безпрецедентний обсяг трафіку, даних і взаємодій між компонентами цих систем.

Разом із розширенням функціональності та масштабуванням IoT-систем зростає і поверхня атак. Багато пристроїв характеризуються обмеженими обчислювальними ресурсами, відсутністю оновлень безпеки та базовими або відсутніми механізмами захисту, що робить їх вразливими до широкого спектра кібератак – від простих DoS-атак до складних сценаріїв компрометації конфіденційних даних і атак типу «людина посередині» (MITM).

Особливо небезпечною є ситуація в умовах високої динамічності IoT-мереж, коли топологія, поведінка пристроїв і рівень ризику постійно змінюються. Традиційні методи оцінювання ризиків, які базуються на детермінованих підходах, виявляються недостатньо ефективними в таких умовах. Їм бракує здатності опрацьовувати неповну, нечітку або суперечливу інформацію, що часто є характерною для реальних IoT-сценаріїв.

У цьому контексті виникає потреба у використанні інтелектуальних підходів до оцінювання ризиків, зокрема методів нечіткої логіки, які дозволяють враховувати невизначеність, суб'єктивну експертну оцінку та гнучко реагувати на зміни в мережі. Побудова ефективної системи оцінювання ризиків на основі нечіткої логіки відкриває нові можливості для забезпечення надійності та адаптивності безпеки IoT-середовищ.

Постановка проблеми. Забезпечення кібербезпеки в середовищі Інтернету речей (IoT) є надзвичайно складним завданням через розподілений характер мереж, різнорідність пристроїв та обмежені ресурси їхньої обчислювальної потужності. Традиційні підходи до аналізу ризиків, зокрема методи, що базуються на строгих числових оцінках або стандартизованих шкалах (наприклад, CVSS, ISO/IEC 27005) – передбачають наявність повної, точної та формалізованої інформації про активи, вразливості, загрози й контекст функціонування. У реальних умовах IoT ці вимоги часто є недосяжними.

Проблема ускладнюється наявністю:

– *невизначеності в даних* щодо ймовірності атак та їх впливу;

– *суб'єктивності в експертних оцінках* і відсутності формальних правил ухвалення рішень;

– *динамічної природи IoT-середовища,* яке швидко змінюється та адаптується.

© Ю. І. Підлісний, 2025

У зв'язку з цим постає науково-практична проблема: *як забезпечити ефективне оцінювання ризиків безпеки в IoT-системах в умовах неповноти, нечіткості та нестабільності вхідної інформації.*

Одним із перспективних напрямів розв'язання цієї проблеми є використання **нечіткої логіки** (fuzzy logic), яка дозволяє:

– *інтерпретувати якісні та лінгвістичні характеристики ризику* (наприклад, «висока вразливість», «низька ймовірність»);

– *моделювати логіку прийняття рішень експертів у вигляді нечітких правил типу IF–THEN*;

– *здійснювати оцінювання ризику навіть за умов невизначеності, суперечливості або часткової відсутності даних.*

Отже, необхідно розробити модель оцінювання ризику безпеки IoT-систем, яка базується на нечіткій логіці, формалізує експертні знання у вигляді нечітких правил та забезпечує інтерпретованість, адаптивність і точність у прийнятті рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття проблема кібербезпеки в середовищі Інтернету речей (IoT) стала предметом активних наукових досліджень. Основна увага зосереджена на виявленні вразливостей, побудові моделей загроз, а також розробці методів аналізу ризиків для гетерогенних і динамічних IoT-систем.

У працях [1, 2] наголошується на особливостях безпеки IoT – численних точках входу, обмежених ресурсах пристроїв та складності централізованого управління безпекою.

Визначальним напрямом у сучасних підходах до оцінювання ризиків стала інтеграція методів штучного інтелекту, зокрема нечітких експертних систем. Так, у [3] і [4] запропоновано гібридні архітектури виявлення аномалій в IoT-мережах із використанням нечітких логічних блоків для покращення інтерпретованості рішень.

У роботах [5] та [6] описано системи оцінювання ризику на основі нечітких продукційних правил, що враховують не тільки рівень вразливості, але й контекст функціонування пристрою (наприклад, місце в мережі, критичність функції). При цьому автори підкреслюють переваги нечіткої логіки у роботі з неповною або якісною інформацією, а також у моделюванні людської експертної інтуїції.

Низка досліджень, зокрема [7; 8], акцентує увагу на необхідності створення адаптивних та масштабованих систем оцінки ризику**,** які могли б ефективно працювати в умовах високої динамічності та гетерогенності IoT-середовищ. Саме нечіткі системи розглядаються як одна з провідних технологій, здатних об'єднати формалізовані правила з експертними оцінками в єдину модель.

Попри значні досягнення, актуальною залишається проблема системної побудови бази нечітких правил, узгодження лінгвістичних змінних між різними джерелами знань та забезпечення пояснюваності результатів. У цьому контексті важливою науковою задачею є формалізація методики побудови нечіткої системи оцінювання ризиків IoT, орієнтованої на практичне застосування в реальних умовах.

Виділення недосліджених проблем. Хоча методи нечіткої логіки широко впроваджуються у практику оцінювання ризиків безпеки IoT-систем, досі залишаються відкритими ключові проблеми, що потребують подальших досліджень:

1. **Недостатня контекстуалізація ризиків.** Більшість наявних моделей зосереджуються на загальних загрозах без глибокого аналізу специфічного контексту роботи IoT-пристроїв, зокрема у промисловості, медичній сфері або смартмістах.

2. **Обмеженість у формалізації нечітких правил.** Існує проблема автоматизації та адаптації бази знань. Переважна більшість підходів використовує фіксовані (ручні) правила, що не враховують динаміку кіберзагроз у реальному часі.

3. **Інтеграція з іншими методами.** Недостатньо досліджено можливості інтеграції нечітких систем з іншими інтелектуальними підходами – такими як штучні нейронні мережі, генетичні алгоритми або баєсівські мережі – для покращення точності оцінювання ризиків.

4. **Масштабованість і продуктивність.** У більшості публікацій відсутній аналіз того, як нечіткі системи оцінювання ризиків працюють у великомасштабних IoT-мережах із тисячами пристроїв і взаємодіями в реальному часі.

5. **Відсутність стандартизації у формуванні вхідних параметрів.** Значення термів лінгвістичних змінних часто обираються довільно, що ускладнює відтворюваність та порівняння результатів між різними дослідженнями.

Таким чином, актуальним напрямом подальших досліджень є розробка адаптивної нечіткої моделі оцінювання ризиків, що враховує контекст функціонування IoT-систем, здатна динамічно оновлювати правила на основі змін у кіберсередовищі та легко масштабуватися під потреби різних сфер застосування.

Мета статті. Метою статті є розроблення підходу до оцінювання ризиків інформаційної безпеки в мережах Інтернету речей (IoT) на основі методів нечіткої логіки, зосереджуючи увагу на побудові бази нечітких правил, визначенні релевантних лінгвістичних змінних і формалізації процесу оцінювання ризиків у контексті динамічних та гетерогенних IoT-середовищ.

У межах досягнення цієї мети передбачається:

1. Провести аналіз існуючих методів оцінювання ризиків безпеки в IoT та виявити їхні обмеження в умовах невизначеності.

2. Сформулювати концептуальну модель оцінювання ризиків на основі нечіткої логіки, адаптовану до специфіки IoT-середовищ.

3. Побудувати базу нечітких продукційних правил, що враховують експертні знання та контекст функціонування пристроїв.

4. Реалізувати модель на прикладі типового сценарію IoT-мережі та оцінити її ефективність порівняно з традиційними підходами.

Виклад основного матеріалу. Стрімке зростання кількості пристроїв Інтернету речей (IoT) супроводжується збільшенням поверхні атаки та підвищеним ризиком реалізації кіберзагроз. Уразливості, що виникають унаслідок слабкого шифрування, недостатньої автентифікації чи застарілого програмного забезпечення, створюють значні загрози як для індивідуальних користувачів, так і для критичної інфраструктури. Враховуючи обмеженість ресурсів IoT-пристроїв, динамічність середовища та високу невизначеність у поведінці компонентів мережі, традиційні методи оцінювання ризиків виявляються недостатньо ефективними. Зокрема, формалізовані числові моделі не здатні повною мірою врахувати неповноту, суб’єктивність і варіативність вхідної інформації, яка характерна для реального IoT-середовища.

У зв’язку з цим постає потреба в аналізі сучасних підходів до оцінювання ризиків безпеки IoT з метою виявлення їхніх сильних сторін та обмежень, особливо в контексті роботи в умовах невизначеності. Такий аналіз є необхідним кроком до обґрунтування доцільності використання альтернативних підходів – зокрема, методів нечіткої логіки, які забезпечують ефективну обробку нечітких, якісних та експертних даних.

Розглянемо основні наявні методи оцінювання ризиків інформаційної безпеки в IoT, а також охарактеризуємо їхні переваги й недоліки в контексті складної, динамічної та непередбачуваної природи середовища Інтернету речей.

1. Провести аналіз існуючих методів оцінювання ризиків безпеки в IoT та виявити їхні обмеження в умовах невизначеності.

Оцінювання ризиків інформаційної безпеки є критично важливим етапом управління кіберзахистом, зокрема в умовах зростання масштабів і складності IoT-середовищ. Протягом останніх років було розроблено низку методик для формалізованої оцінки ризиків, серед яких найпоширенішими є:

a) *CVSS (Common Vulnerability Scoring System)* – система, яка надає числову оцінку вразливостей за низкою показників: базових, тимчасових та контекстуальних;

b) *EBIOS (Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité)* – методологія оцінювання ризиків, розроблена ANSSI (Франція), яка ґрунтується на моделюванні загроз і потреб у безпеці;

c) *OCTAVE (Operationally Critical Threat, Asset, and Vulnerability Evaluation)* – метод, який орієнтований на визначення активів, вразливостей та загроз, із подальшим оцінюванням ризиків;

d) ISO/IEC 27005 – міжнародний стандарт, що регламентує процес оцінки інформаційних ризиків у межах систем управління інформаційною безпекою (ISMS).

Попри те, що ці методи добре зарекомендували себе в корпоративному IT-середовищі, вони мають суттєві обмеження при застосуванні в IoT-мережах, які характеризуються високим рівнем динамічності, розподіленості та технічної гетерогенності. Серед основних проблем можна виділити таке:

a) **Необхідність повних і точних даних.** Більшість методів вимагає наявності повної інформації про активи, типи вразливостей, шляхи реалізації атак, що у випадку IoT часто неможливо через обмежену спостережуваність пристроїв [11] (автори наголошують, що серед викликів у IoT – *«обмежена спостережуваність пристроїв», та що традиційні методи потерпають через ускладнену класифікацію активів і труднощі з отриманням точних даних*).

b) **Складність формалізації якісних чинників.** Наприклад, такі характеристики, як «критичність пристрою» чи «ймовірність компрометації» у контексті IoT, часто мають експертний або умовний характер і важко піддаються числовій оцінці [12]: *«Із зростанням складності, повсюдності та автоматизації технологічних систем, зокрема в контексті Інтернету речей (IoT), існує переконливий аргумент на користь того, що нам потрібні нові підходи до оцінювання ризиків і формування довіри до систем»*.

c) **Відсутність адаптивності.** Багато підходів засновані на фіксованих процедурах, які не враховують швидкі зміни в топології мережі чи поведінці пристроїв, що притаманні динамічним IoT-середовищам. Як підкреслюють автори [13], *«традиційні політики безпеки, розроблені для статичних середовищ, не здатні ефективно реагувати на динамічний, гетерогенний і ресурсно обмежений характер Інтернету речей (IoT)»*, що підкреслює необхідність розробки адаптивних та контекстно орієнтованих підходів до аналізу ризиків у таких системах.

d) **Ігнорування невизначеності та неповноти.** Традиційні системи оперують точними значеннями та не можуть працювати з розмитими або суперечливими вхідними даними, що часто спостерігається в IoT через фрагментованість джерел інформації [14].

e) **Складність масштабування.** У випадках, коли IoT-мережі охоплюють сотні або тисячі пристроїв, класичні методи стають громіздкими та трудомісткими у використанні. За словами [15], *«ці аналізи демонструють проблеми з масштабованістю, коли застосовуються до великої кількості IoT-додатків»*. Це підтверджує нагальну потребу в розробці легких, адаптивних та масштабованих моделей для IoT.

Таким чином, на тлі зростаючої складності, масштабності та гетерогенності IoT-середовищ застосування традиційних моделей оцінювання ризиків часто виявляється неефективним. Їхні обмеження – зокрема вимога повноти даних, низька адаптивність, складність формалізації якісних чинників, ігнорування невизначеності та труднощі з масштабуванням – призводять до зниження точності результатів, втрати актуальності або

надмірного спрощення складних сценаріїв загроз. У зв'язку з цим постає об'єктивна потреба у впровадженні інтелектуальних підходів, здатних працювати з нечіткими, частковими та суперечливими даними, а також враховувати специфіку та контекст функціонування IoT-систем.

Одним із перспективних напрямів є використання методів нечіткої логіки – інструменту, що дозволяє моделювати експертні знання у формі продукційних правил, працювати з лінгвістичними змінними та адаптуватися до динаміки кіберзагроз.

2. Сформулювати концептуальну модель оцінювання ризиків на основі нечіткої логіки, адаптовану до специфіки IoT-середовищ.

Враховуючи обмеження традиційних підходів до оцінювання ризиків у середовищах Інтернету речей, доцільно використати нечітку логіку як базову методологію для створення адаптивної, гнучкої та контекстно чутливої системи аналізу безпекових ризиків. Запропонована модель базується на поєднанні експертних знань та формалізованих правил нечіткого логічного виведення, що дозволяє враховувати невизначеність, неповноту та розмитість інформації. У межах цього дослідження запропоновано новий підхід до оцінювання ризиків безпеки в IoT-середовищах, який поєднує методи нечіткої логіки з контекстно залежним аналізом функціонування пристроїв. Цей підхід дозволяє враховувати як технічні характеристики, так і роль пристрою в мережі, тип взаємодії та середовище його використання.

2.1. Концептуальна модель оцінювання ризиків на основі нечіткої логіки.

Концептуально модель оцінювання ризиків IoT включає такі ключові компоненти:

А. *Вхідні лінгвістичні змінні:* характеристики ризику, які важко виміряти точно, але можуть бути описані мовою експертів (наприклад, імовірність атаки, критичність пристрою, рівень захисту).

Б. *Фазифікація:* перетворення чітких значень (наприклад, числових або категоріальних) у нечіткі множини для подальшої обробки.

В. *Нечітка база продукційних правил* типу IF–THEN, які моделюють експертну логіку оцінювання ризиків.

Г. *Механізм нечіткого логічного виведення* (наприклад, Mamdani або Sugeno), який визначає ступінь відповідності вхідних даних до встановлених правил.

Д. *Дефазифікація:* перетворення результату нечіткого логічного виведення в чітке числове значення ризику.

Е. *Модуль адаптації:* здатність моделі змінювати ваги змінних або оновлювати базу правил відповідно до змін середовища чи накопичення нових знань.

Описана вище структура моделі є універсальною для широкого кола задач нечіткого оцінювання ризиків. Проте для її ефективного застосування в середовищах Інтернету речей (IoT) вона потребує додаткової адаптації. Це зумовлено специфічними особливостями архітектури, динаміки та обмежень IoT-систем, які суттєво впливають як на природу ризиків, так і на методи їх оцінювання.

У зв'язку з цим при формуванні моделі були враховані такі унікальні властивості IoT-середовищ:

А. *Динамічність:* топологія, активність пристроїв та ризиковий профіль змінюються в реальному часі.

Б. *Гетерогенність:* різні типи пристроїв (сенсори, шлюзи, контролери) мають різний ступінь критичності та захищеності.

В. *Обмежені ресурси:* модель повинна бути легкою у розгортанні та не вимагати складних обчислень на периферійних пристроях.

Г. *Контекстна залежність:* оцінка ризику залежить не лише від технічних характеристик, а й від ролі пристрою у загальній бізнес-логіці системи.

Для кращого розуміння логіки функціонування запропонованої моделі нижче представлено її узагальнену структурну схему, що відображає основні етапи обробки даних, взаємодію компонентів та потік інформації від вхідних параметрів до остаточного результату оцінювання ризику.

На рис. 1 зображено структурну модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки в IoT-середовищі на основі нечіткої логіки. Схема демонструє послідовність проходження даних: від надходження лінгвістично описаних вхідних характеристик (наприклад, ймовірність атаки, критичність пристрою) до формування інтегрованої числової оцінки ризику через механізми фазифікації, нечіткого логічного виведення та дефазифікації.

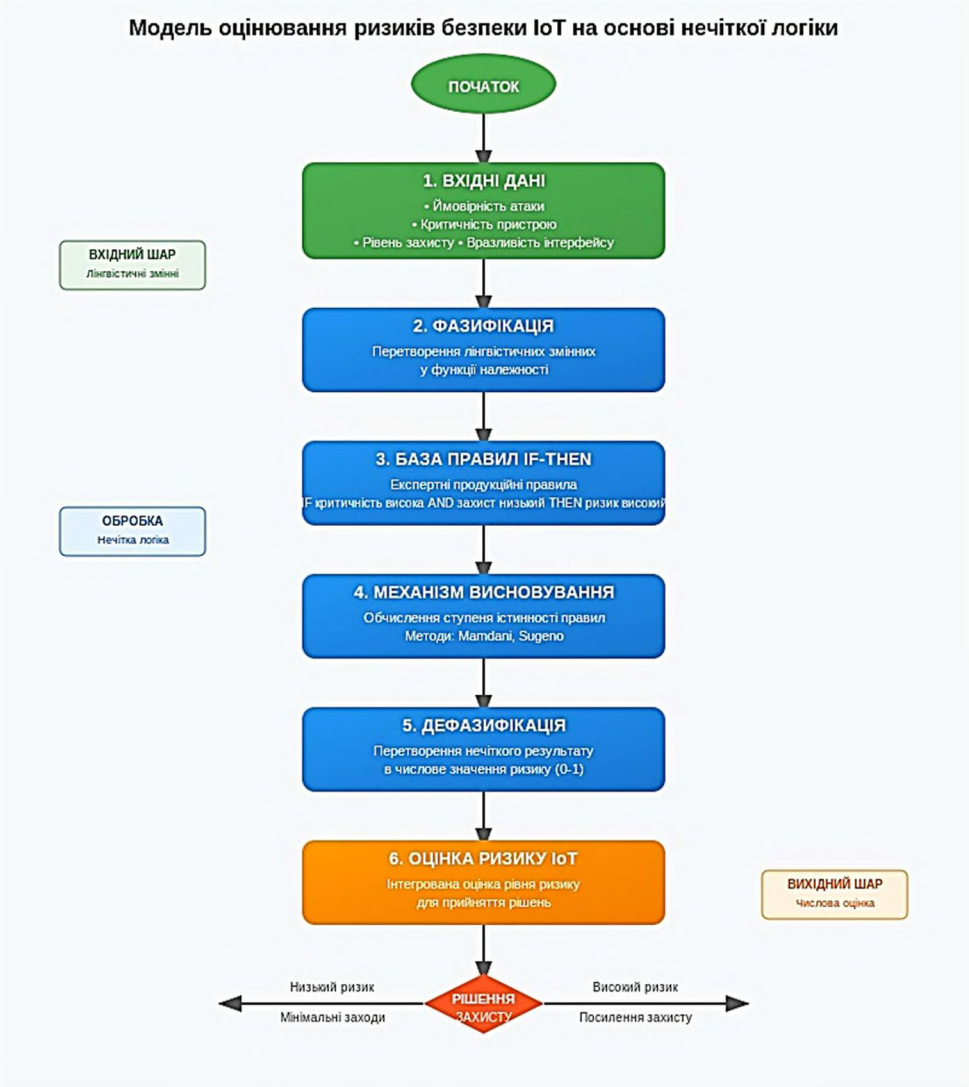


Рис. 1. Структурна модель оцінювання ризиків в IoT на основі нечіткої логіки
Джерело: розроблено автором.

Як видно з рис. 1, модель складається з кількох послідовних етапів обробки, кожен з яких виконує специфічну функцію в процесі оцінювання ризику. Далі детально розглянемо зміст та призначення кожного з компонентів:

А. Вхідні дані.

На цьому етапі до системи надходять параметри, що характеризують поточний стан IoT-середовища. Це можуть бути як технічні показники (наприклад, кількість відкритих портів, наявність вразливостей, тип пристрою), так і експертні оцінки (наприклад, критичність функції пристрою або ймовірність атаки).

Б. Фазифікація.

Вхідні лінгвістичні змінні (наприклад, «високий ризик», «низька захищеність») перетворюються на функції належності, які дозволяють моделі працювати з розмитими, нечітко визначеними значеннями.

В. База нечітких правил IF–THEN.

Цей компонент містить формалізовані експертні знання у вигляді продукційних правил типу «Якщо – То». Наприклад: *«Якщо критичність пристрою висока і рівень захисту низький, то ризик високий»*. Кожне правило оцінюється відповідно до вхідних даних.

Г. Механізм нечіткого логічного виведення.

На цьому етапі виконується об'єднання результатів застосування усіх правил для формування узагальненої нечіткої оцінки ризику. Найчастіше використовується метод Мамдані або Сугено.

Д. Дефазифікація.

Нечітке значення, сформоване в попередньому блоці, перетворюється у конкретне числове або категоріальне значення (наприклад, 0,72 або «середній ризик»).

Е. Оцінка ризику.

Таким чином, концептуальна модель визначає основні етапи оцінювання ризику в IoT-середовищі. Для практичної реалізації цієї моделі необхідно задати параметри функцій належності вхідних та вихідної змінних, що й розглянуто у наступному підрозділі.

2.2. Параметри функцій належності

Для забезпечення відтворюваності результатів у роботі подано параметри функцій належності вхідних і вихідної лінгвістичних змінних. Усі змінні нормовано до діапазону [0; 10]. Для фазифікації використано трикутні (trimf) та трапецієподібні (trapmf) функції. Механізм нечіткого логічного виведення – Мамдані; оператори: AND = min, OR = max; імплікація = min; агрегування = max; дефазифікація – centroid.

Вхідні змінні:

a. Рівень вразливості пристрою (Low, Medium, High);
b. Критичність функцій (Low, Medium, High);
c. Захищеність каналу *зв'язку* (Low, Medium, High).

Вихідна змінна:

a. Рівень ризику (Low, Moderate, High, Critical).

Параметри функцій належності наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри функцій належності

Змінна	**Терм**	**Форма**	**Параметри**
Вразливість	Low	trimf	[0, 0, 4]
	Medium	trimf	[2, 5, 8]
	High	trimf	[6, 10, 10]
Критичність	Low	trapmf	[0, 0, 2, 4]
	Medium	trimf	[3, 5, 7]
	High	trapmf	[6, 8, 10, 10]
Захищеність каналу	Low	trapmf	[0, 0, 2, 4]
	Medium	trimf	[3, 5, 7]
	High	trapmf	[6, 8, 10, 10]
Ризик	Low	trapmf	[0, 0, 1.5, 3.5]
	Moderate	trimf	[2.5, 5, 7.5]
	High	trimf	[6.5, 8, 9.5]
	Critical	trapmf	[8.5, 9.5, 10, 10]

Для наочності на рис. 2 подано графічне зображення функцій належності для вхідних та вихідної змінних. Видно, що терми мають плавні переходи та перекриття, що забезпечує адекватне відображення проміжних станів і контекстно залежне оцінювання ризику.

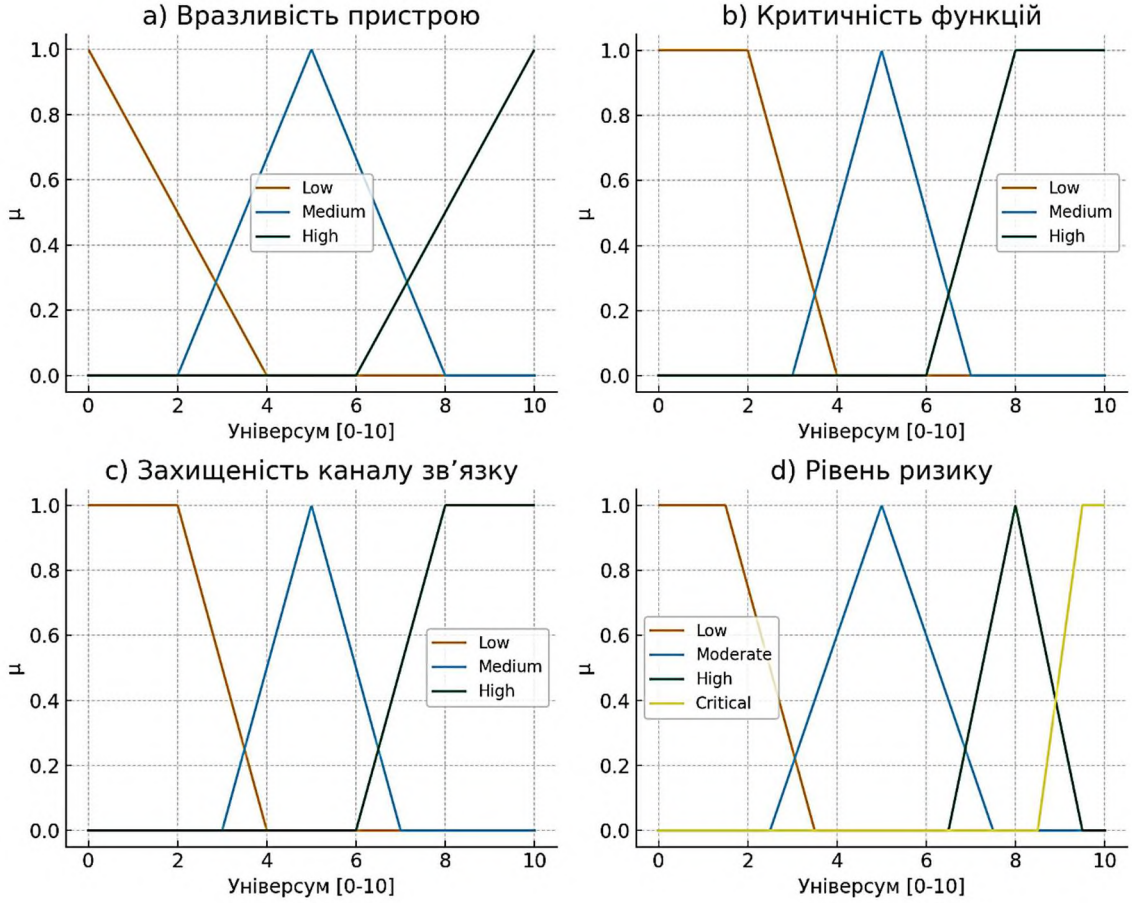


Рис. 2. Функції належності для вхідних і вихідної змінних
Джерело: розроблено автором.

Отже, табл. 1 та рис. 2 забезпечують як формальну відтворюваність (через числові параметри), так і наочність моделі (через графічне подання функцій належності). Завдяки плавним переходам між термами й перекриттю областей визначення досягається можливість адекватного опису проміжних станів та обробки невизначеності у вхідних даних.

3. **Побудувати базу нечітких продукційних правил, що враховують експертні знання та контекст функціонування пристроїв.**

Оцінювання ризиків у середовищах Інтернету речей (IoT) вимагає гнучких методів, здатних працювати з неоднозначною, неповною та контекстно залежною інформацією. У зв'язку з цим у рамках запропонованої моделі особливу увагу приділено формуванню бази нечітких продукційних правил, яка відображає як технічні параметри пристроїв, так і експертні знання про їхню поведінку, призначення та ступінь критичності.

На відміну від традиційних моделей, що вимагають точних числових оцінок, нечітка база правил дозволяє описати взаємозв'язки між факторами ризику в лінгвістичній формі, наближеній до природної мови експертів. Це є особливо цінним в умовах IoT, де багато пристроїв не мають достатнього логування подій, а дані про вразливості або загрози – фрагментарні.

Кожне правило має загальний вигляд:

IF (умова 1) AND (умова 2) AND ... THEN (висновок).

Умови формуються на основі таких лінгвістичних змінних:

a. *Рівень вразливості пристрою:* (низький, середній, високий);

b. *Ступінь критичності функцій:* (некритичний, помірно критичний, критичний);

c. *Рівень безпеки каналу зв'язку:* (зашифрований, частково зашифрований, відкритий);
d. *Тип доступу до пристрою:* (локальний, віддалений, змішаний);
e. *Тип пристрою:* (сенсор, шлюз, контролер, вузол обробки).

Висновок формулюється як рівень ризику: (низький, помірний, високий, критичний).

Приклад нечіткого правила:

F `вразливість` = **висока** AND `критичність` = **критичний** AND `канал` = **відкритий** THEN `ризик` = **дуже високий.**

З метою ілюстрації логіки побудови бази нечітких продукційних правил на основі експертних оцінок та контекстних характеристик пристроїв на рис. 3 наведено відповідну блок-схему, яка демонструє основні етапи формування правил у запропонованій моделі.

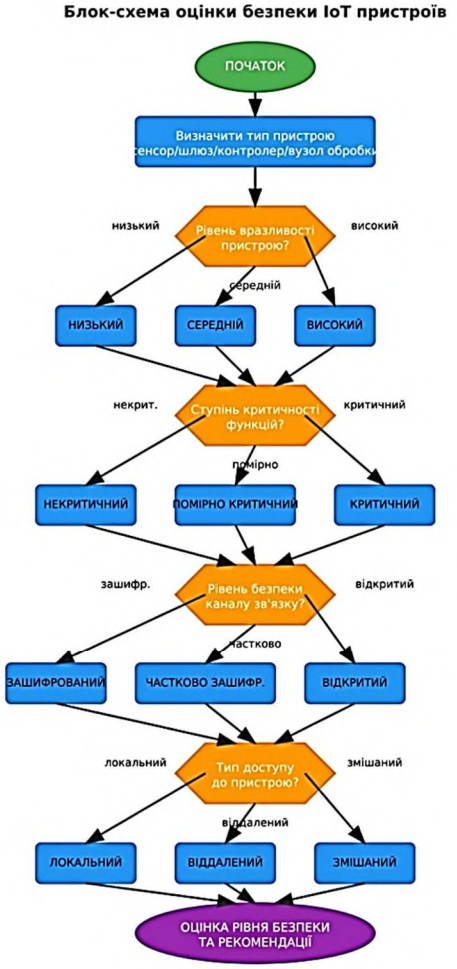


Рис. 3. Блок-схема оцінки безпеки IoT пристроїв

Джерело: розроблено автором.

Представлена на рис. 3 блок-схема демонструє загальні принципи побудови нечітких продукційних правил на основі лінгвістичних змінних, що застосовуються для формалізації експертних знань. Водночас для ефективного застосування цієї моделі в умовах реального IoT-середовища виникає необхідність у її контекстній адаптації – з урахуванням особливостей топології, ролі пристрою в мережі та специфіки взаємодії. Під контекстом розуміються такі характеристики, як місце в мережі (edge/core), тип взаємодії (M2M, user-device), а також характер середовища (медичне, промислове, побутове). Така контекстуалізація дозволяє:

а. адаптувати правила під специфіку сфери застосування IoT (наприклад, у промислових системах критичність шлюзів є вищою, ніж у побутових);

б. уточнювати терми в лінгвістичних змінних;

в. задавати динамічні ваги для різних умов (наприклад, у критичних зонах ризик зростає швидше).

Таким чином, контекстуалізація дозволяє значно підвищити точність та адаптивність системи оцінювання ризиків, формуючи правила, релевантні до конкретного середовища функціонування IoT-пристрою. З огляду на це, наступним ключовим кроком є безпосередня побудова бази продукційних правил, яка і реалізує логіку оцінювання ризику на основі поєднання технічних параметрів та контекстуальних ознак.

Методологія формування правил. Базу нечітких продукційних правил сформовано за допомогою поєднання трьох підходів:

a) *Аналіз стандартів і методик* (CVSS, ISO/IEC 27005, EBIOS) – для визначення базових факторів ризику.

b) *Аналіз наукових публікацій* [5-8, 11-15], де наведено типові сценарії атак і приклади нечітких систем для IoT.

c) *Експертне опитування* фахівців з кібербезпеки (метод Delphi у два раунди), які оцінювали комбінації вразливості, критичності та рівня захищеності каналів.

Побудова бази правил здійснюється у два етапи:

a) *Експертне визначення факторів ризику* та їхніх лінгвістичних термів.

b) *Формування нечітких правил на основі сценаріїв загроз*, типових для IoT-мереж (наприклад, несанкціонований доступ, атаки типу DoS, перехоплення трафіку, компрометація вузла керування тощо).

Для ілюстрації логіки формування правил нижче наведено приклад таблиці (матриці), у якій представлено взаємозв'язок між вразливістю, критичністю, типом доступу та іншими факторами ризику в контексті IoT.

Таблиця 2 – Нечіткі правила оцінювання ризику в IoT

Вразливість	**Критичність функцій**	**Захист каналу**	**Тип доступу**	**Тип пристрою**	**Середовище**	**Ризик**
Висока	Критична	Відкритий	Віддалений	Шлюз	Промислове	Дуже високий
Висока	Критична	Частково захищений	Віддалений	Контролер	Медичне	Дуже високий
Середня	Помірно критична	Частково захищений	Змішаний	Сенсор	Побутове	Помірний
Низька	Некритична	Зашифрований	Локальний	Сенсор	Побутове	Низький
Середня	Критична	Відкритий	Віддалений	Вузол обробки	Критична інфраструктура	Високий
Висока	Помірно критична	Зашифрований	Віддалений	Контролер	Промислове	Високий
Середня	Некритична	Зашифрований	Локальний	Сенсор	Побутове	Низький
Висока	Критична	Зашифрований	Віддалений	Вузол обробки	Медичне	Високий

Джерело: розроблено автором.

Представлена табл. 2 демонструє приклади нечітких правил, сформованих на основі комбінації технічних та контекстуальних факторів. Вона ілюструє, як система може визначати рівень ризику залежно від поєднання таких змінних, як критичність функцій пристрою, тип доступу, рівень захисту каналу та середовище експлуатації.

Завдяки використанню лінгвістичних термів і контекстної інформації система здатна адаптивно реагувати на зміну умов, забезпечуючи більш точне та інтерпретоване оцінювання ризику. Такий підхід підвищує гнучкість та ефективність кіберзахисту в умовах гетерогенних та динамічних IoT-мереж.

4. Реалізувати модель на прикладі типового сценарію IoT-мережі та оцінити її ефективність порівняно з традиційними підходами.

Для демонстрації практичної реалізації запропонованої моделі було змодельовано типовий фрагмент IoT-мережі, що включає гетерогенні пристрої з різними рівнями критичності, типами доступу, каналами зв'язку та контекстами функціонування (побутовий, промисловий). Такий підхід дозволяє перевірити адаптивність і точність запропонованої системи оцінювання ризиків у різних умовах. Описана мережа містить ключові компоненти сучасного IoT-середовища – сенсори, контролери, шлюзи, вузли обробки та хмарну інфраструктуру – і відображає характерні зв'язки між ними, включаючи локальні та віддалені з'єднання, а також різний рівень захисту каналів передачі даних. У моделі враховано як технічні, так і контекстуальні характеристики пристроїв, що дозволяє оцінити ризики з урахуванням їхнього функціонального призначення, місця в мережі та середовища експлуатації.

На рис. 4 представлено узагальнену схему змодельованого фрагмента IoT-мережі, яка візуалізує структурні компоненти, рівні ризику та типи комунікаційних каналів. Схема ілюструє взаємозв'язки між пристроями в контексті запропонованої моделі оцінювання ризиків, що ґрунтується на лінгвістичних змінних та контекстно орієнтованих правилах.

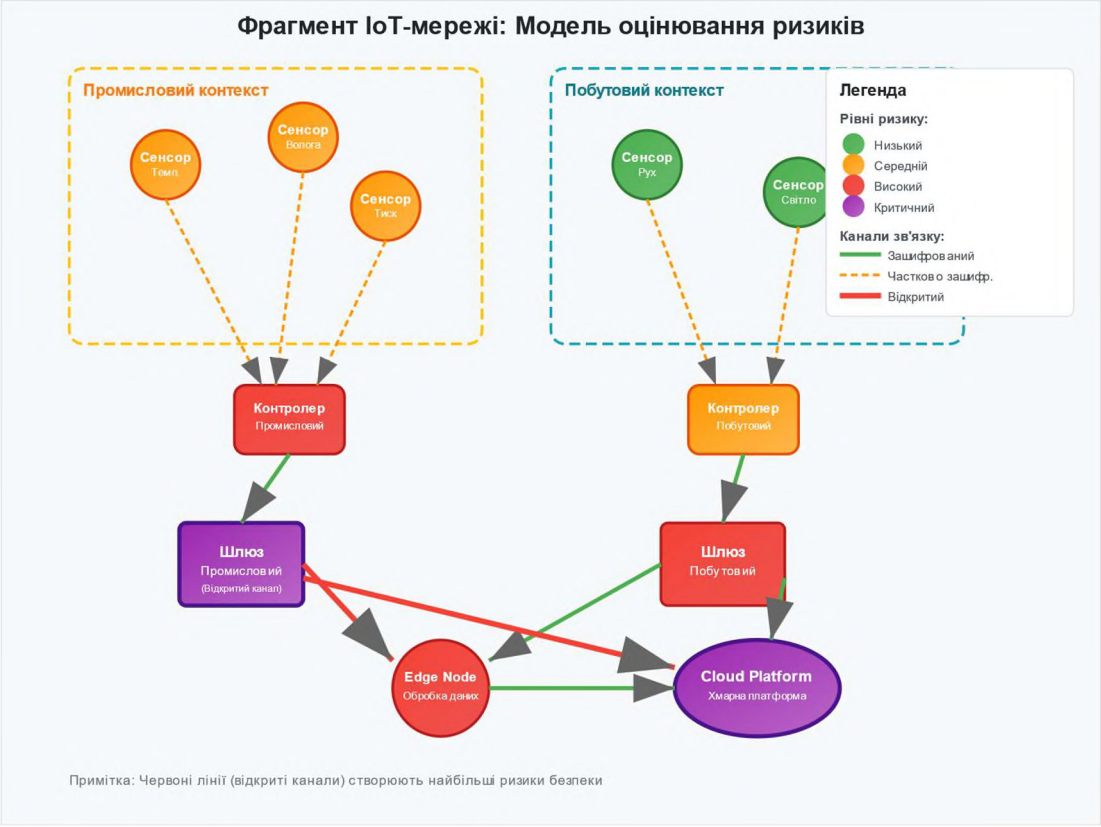


Рис. 4. Узагальнена схема IoT-мережі

Джерело: розроблено автором.

Для реалізації моделі оцінювання ризиків було використане середовище MATLAB із використанням Fuzzy Logic Toolbox. Було створено нечітку логічну систему типу Mamdani [16] з трьома вхідними змінними: рівень вразливості, критичність функцій пристрою та рівень захищеності каналу зв'язку та однією вихідною змінною – рівнем ризику.

Для кожної із вхідних змінних визначено по три терми (низький, середній, високий), а для вихідної – чотири (низький, помірний, високий, критичний), що дозволяє точніше моделювати перехідні стани.

Базу нечітких продукційних правил було сформовано програмно, враховуючи взаємозв'язок вхідних факторів. Загалом реалізовано 27 правил, які описують комбінації умов і відповідних рівнів ризику. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес прийняття рішень, що особливо важливо в умовах швидкозмінного середовища IoT.

Результати моделювання подано у вигляді поверхні нечіткої логічної інтерпретації (рис. 5), яка демонструє залежність рівня ризику від рівня вразливості та критичності при фіксованому рівні захищеності каналу. Видно, що найвищі ризики виникають у ситуаціях, коли пристрій є водночас критичним і вразливим, а канал передачі даних – незахищеним.

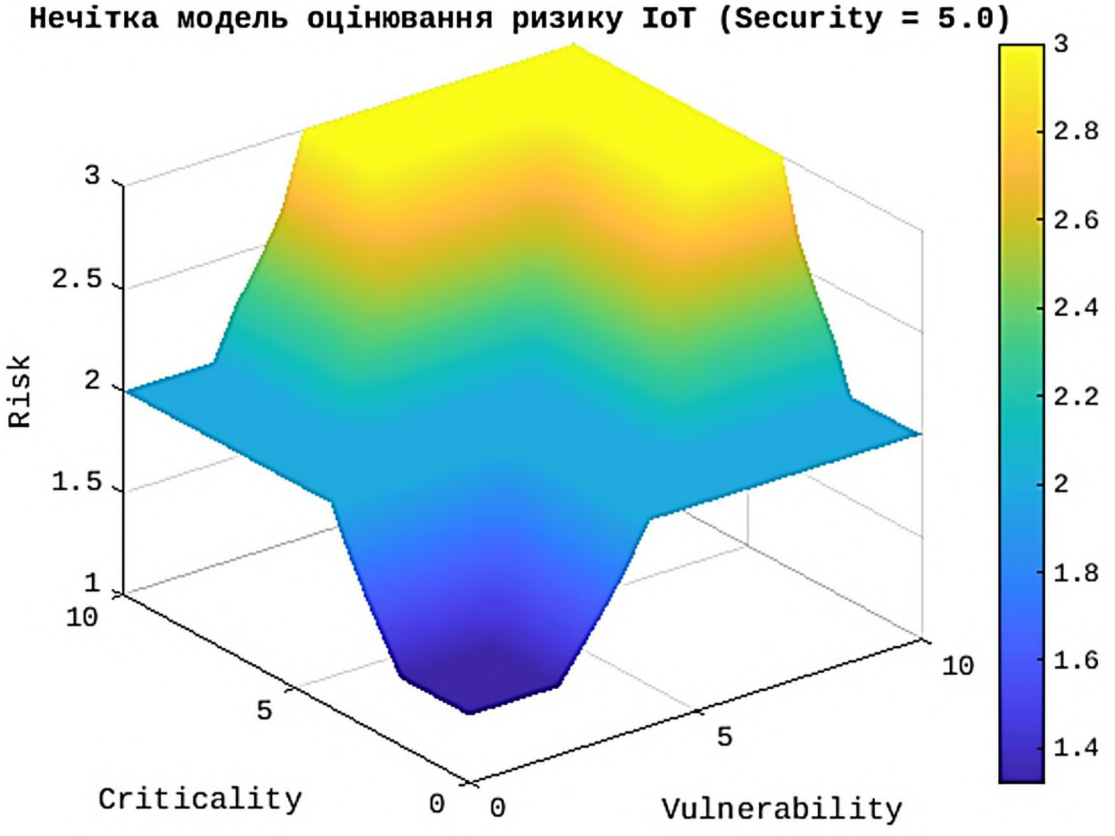


Рис. 5. Тривимірна візуалізація оцінювання ризику в IoT на основі нечіткої логіки
Джерело: розроблено автором.

Процедура оцінювання за методологією EBIOS. Для проведення порівняльного аналізу використано методологію *EBIOS (Expression des Besoins et Identification des Objectifs de Sécurité)*, яка включає такі основні етапи:

1. *Ідентифікація контексту* – визначено пристрої (сенсори, контролери, шлюзи, вузли обробки), їх функції та середовище експлуатації (промислове, медичне, побутове).
2. *Моделювання загроз* – враховано потенційні атаки (DoS, MITM, несанкціонований доступ, компрометація вузлів керування).
3. *Оцінка ймовірності реалізації загроз* – виконувалась за якісною шкалою (низька, середня, висока) залежно від типу доступу, рівня захищеності каналів та відомих вразливостей.
4. *Оцінка впливу на бізнес-процеси* – визначено три рівні: низький, високий, критичний.
5. *Визначення рівня ризику* – поєднання ймовірності та впливу згідно з матрицею EBIOS.

Наприклад, вузол обробки у промисловому контексті отримав категорію *Критичний*, оскільки навіть при середній ймовірності атаки наслідки призводять до порушення критичних бізнес-процесів. Натомість побутовий сенсор із низькою вразливістю та захищеним каналом класифіковано як *Низький ризик*, адже вплив на систему у випадку компрометації є мінімальним.

З метою об'єктивного порівняння запропонованої моделі на основі нечіткої логіки з усталеною методологією EBIOS було проведено оцінювання ризиків для однакових умов у типовому фрагменті IoT-мережі. В обох випадках враховувалися ключові фактори: рівень вразливості пристрою, критичність його функцій та рівень захисту каналу зв'язку. У той час як EBIOS базується на дискретній класифікації ризиків за заздалегідь визначеними пороговими значеннями, модель Mamdani забезпечує континуальне (плавне) оцінювання з використанням нечітких лінгвістичних правил.

У табл. 3 наведено результати оцінювання ризиків для вибірки з 8 типових пристроїв у мережі**,** які функціонують у різних контекстах (промисловому, медичному, побутовому). Для кожного пристрою вказано значення трьох вхідних параметрів, а також результати оцінки ризику за обома підходами.

Таблиця 3 – Порівняння результатів оцінювання ризику: нечітка логіка і EBIOS

Пристрій	**Вразливість**	**Критичність**	**Захист каналу**	**Ризик (Fuzzy)**	**Ризик (EBIOS)**
Шлюз промисловий	Висока	Критична	Низький	9.1 (Критичний)	Критичний
Контролер медичний	Висока	Критична	Середній	7.8 (Високий)	Високий
Сенсор побутовий	Середня	Помірна	Середній	5.1 (Помірний)	Середній
Сенсор побутовий	Низька	Низька	Високий	2.4 (Низький)	Низький
Вузол обробки	Середня	Критична	Низький	7.3 (Високий)	Критичний
Контролер промисловий	Висока	Помірна	Високий	6.4 (Високий)	Середній/Високий
Сенсор побутовий	Середня	Низька	Високий	3.1 (Низький)	Низький
Вузол обробки	Висока	Критична	Високий	7.0 (Високий)	Високий

Джерело: розроблено автором.

Як видно з табл. 3, модель Mamdani дозволяє більш гнучко враховувати комбінації факторів, забезпечуючи детальніший спектр ризиків. Наприклад, для вузла обробки з критичними функціями та середнім рівнем захисту EBIOS присвоює найвищу категорію («Критичний»), тоді як нечітка модель дає значення *7.3*, що відповідає високому, але не максимальному рівню. Така точність може бути критично важливою при автоматичному розгортанні заходів реагування в умовах обмежених ресурсів.

Адаптивність моделі. У представлених експериментах розглянуто переважно статичні сценарії, проте важливою особливістю запропонованої моделі є здатність до адаптації. Це забезпечується такими механізмами:

1. *Динамічне оновлення правил.* База нечітких правил може бути автоматично доповнена або змінена залежно від нових подій у мережі. Наприклад, при виявленні нового типу атаки (перехоплення трафіку, підробка сенсора) формується додаткове правило IF–THEN, яке відображає змінені умови.

2. *Актуалізація ваг факторів ризику.* В умовах змін у середовищі (наприклад, підвищення критичності шлюзу у промисловому контексті) модель дозволяє оперативно скоригувати ваги лінгвістичних змінних без повного переналаштування системи.

3. *Інтеграція з потоковим моніторингом.* Використання MATLAB/Simulink дає можливість реалізувати обробку даних у реальному часі, що дозволяє змінювати параметри функцій належності або додавати нові правила на основі поточного стану мережі.

Таким чином, запропонована модель може працювати не лише у статичних сценаріях, але й у динамічних умовах, коли топологія мережі та характер загроз постійно змінюються. Це підтверджує її потенціал для практичного застосування у системах моніторингу та реагування на інциденти в IoT.

Висновки. У ході дослідження було запропоновано та реалізовано контекстно орієнтовану модель оцінювання ризиків в IoT-середовищі на основі нечіткої логіки. Модель враховує не лише технічні характеристики пристроїв, а і їхню критичність, тип каналів зв'язку та контекст експлуатації. Завдяки використанню лінгвістичних змінних і нечіткого виведення типу Mamdani вдалося побудувати систему, здатну адаптивно оцінювати рівень ризику в умовах високої динамічності, гетерогенності та неповноти даних, що притаманні IoT-мережам.

Проведено моделювання типового фрагмента IoT-мережі в MATLAB з візуалізацією поверхні оцінювання ризику, а також виконано порівняльний аналіз результатів із традиційною методологією EBIOS. Отримані результати демонструють перевагу запропонованого підходу у точності, гнучкості й здатності до пояснюваності рішень.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано контекстно орієнтовану модель оцінювання ризиків в IoT-мережах з урахуванням критичності, вразливості та типу захищеності каналів зв'язку.

2. Розроблено методику формування бази нечітких продукційних правил, яка поєднує аналіз стандартів (CVSS, ISO/IEC 27005, EBIOS), наукових публікацій та експертних оцінок (метод Delphi). Це забезпечує відтворюваність та обґрунтованість логіки правил, що відрізняє підхід від існуючих статичних моделей. Реалізовано нечітке виведення типу Mamdani з лінгвістичними змінними, що забезпечує більш природне і адаптивне оцінювання ризику порівняно з класичними методами.

3. Проведено порівняльний аналіз з методологією EBIOS, що дозволило емпірично обґрунтувати переваги запропонованої моделі в умовах реальних IoT-сценаріїв.

Практична значимість результатів:

1. Розроблена модель може бути застосована в системах моніторингу кібербезпеки IoT для автоматичного визначення рівня ризику і пріоритезації заходів реагування.

2. Результати можуть бути використані в процесі проєктування безпечних IoT-інфраструктур, зокрема у промислових, побутових та критичних середовищах.

3. Інструментарій реалізовано у MATLAB, що дозволяє легко адаптувати його для практичних впроваджень, тестування та навчання.

4. Підхід забезпечує можливість швидкої адаптації до нових загроз шляхом зміни або доповнення правил, що критично важливо для гнучкого реагування у реальному часі.

Отже, результати дослідження підтверджують доцільність використання нечітких моделей для оцінювання ризиків у гетерогенному середовищі IoT. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність і гнучкість рішень, а також слугує основою для побудови більш стійких і адаптивних систем інформаційної безпеки.

Список використаних джерел

1. Roman, R., Najera, P., & Lopez, J. (2011). Securing the internet of things. Computer, *44*(9), 51-58. https://doi.org/10.1109/mc.2011.291.

2. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, *76*, 146-164. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008.

3. Zeadally, S., Isaac, J. T., & Baig, Z. (2016). Security attacks and solutions in electronic health (e-health) systems. Journal of Medical Systems, *40*(12). https://doi.org/10.1007/s10916-016-0597-z.

4. Alrashdi, I., Alqazzaz, A., Aloufi, E., Alharthi, R., Zohdy, M., & Ming, H. (2019). AD-IoT: Anomaly detection of IoT cyberattacks in smart city using machine learning. У *2019 IEEE 9th annual computing and communication workshop and conference (CCWC)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ccwc.2019.8666450.

5. Atlam, H. F., Walters, R. J., Wills, G. B., & Daniel, J. (2019). Fuzzy logic with expert judgment to implement an adaptive risk-based access control model for IoT. *Mobile Networks and Applications*. https://doi.org/10.1007/s11036-019-01214-w.

6. Al-Kasassbeh, M., Almseidin, M., Alrfou, K., & Kovacs, S. (2020). Detection of IoT-botnet attacks using fuzzy rule interpolation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *39*(1), 421-431. https://doi.org/10.3233/jifs-191432.

7. Kouicem, D. E., Bouabdallah, A., & Lakhlef, H. (2018). Internet of things security: A top-down survey. *Computer Networks*, *141*, 199-221. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.03.012.

8. Kerimkhulle, S., Dildebayeva, Z., Tokhmetov, A., Amirova, A., Tussupov, J., Makhazhanova, U., Adalbek, A., Taberkhan, R., Zakirova, A., & Salykbayeva, A. (2023). Fuzzy logic and its application in the assessment of information security risk of industrial internet of things. *Symmetry*, *15*(10), 1958. https://doi.org/10.3390/sym15101958.

9. Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, *57*(10), 2266-2279. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018.

10. Kerimkhulle, S., Dildebayeva, Z., Tokhmetov, A., Amirova, A., Tussupov, J., Makhazhanova, U., Adalbek, A., Taberkhan, R., Zakirova, A., & Salykbayeva, A. (2023b). Fuzzy logic and its application in the assessment of information security risk of industrial internet of things. *Symmetry*, *15*(10), 1958. https://doi.org/10.3390/sym15101958.

11. Al-Khafajiy, A., Hussain, A., Baker, T., Aslam, N., & Alazab, M. (2025). A hybrid deep learning-based risk assessment model for securing the Internet of Things. *Computers & Security, 140,* Article 103419. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404825001452.

12. Nurse, J. R. C., Radanliev, P., Creese, S., & De Roure, D. (2018b). If you can't understand it, you can't properly assess it! The reality of assessing security risks in Internet of Things systems. У *Living in the internet of things: Cybersecurity of the* IoT - *2018*. Institution of Engineering and Technology. https://doi.org/10.1049/cp.2018.0001.

13. Alaba, F. A., Othman, M., Hashem, I. A. T., & Alotaibi, F. (2017). Internet of Things security: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, *88*, 10-28. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.04.002.

14. Pal, S., Khalifa, S., Miller, D., Dedeoglu, V., Dorri, A., Ramachandran, G., Moghadam, P., Kusy, B., & Jurdak, R. (2024). Uncertainty propagation in the internet of things. *Discover Internet of Things*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s43926-024-00085-2.

15. Ibrahim Abdul Abdulrahman, Gabriel Tosin Ayodele, Grace Efahn Egbedion, Jacob Alebiosu, Ezeagba Jetta Somtochukwu & Omotolani Eniola Akinbolajo. (2025). Securing Internet of Things (IoT) ecosystems: Addressing scalability, authentication, and privacy challenges. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *26*(1), 523-534. https://doi.org/ 10.30574/wjarr.2025.26.1.0999.

16. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, *7*(1), 1-13. https://doi.org/10.1016/ s0020-7373(75)80002-2.

References

1. Roman, R., Najera, P., & Lopez, J. (2011). Securing the internet of things. Computer, *44*(9), 51-58. https://doi.org/10.1109/mc.2011.291.

2. Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead. *Computer Networks*, *76*, 146-164. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.11.008.

3. Zeadally, S., Isaac, J. T., & Baig, Z. (2016). Security attacks and solutions in electronic health (e-health) systems. Journal of Medical Systems, *40*(12). https://doi.org/10.1007/s10916-016-0597-z.

4. Alrashdi, I., Alqazzaz, A., Aloufi, E., Alharthi, R., Zohdy, M., & Ming, H. (2019). AD-IoT: Anomaly detection of IoT cyberattacks in smart city using machine learning. У *2019 IEEE 9th annual computing and communication workshop and conference (CCWC)*. IEEE. https://doi.org/10.1109/ccwc.2019.8666450.

5. Atlam, H. F., Walters, R. J., Wills, G. B., & Daniel, J. (2019). Fuzzy logic with expert judgment to implement an adaptive risk-based access control model for IoT. *Mobile Networks and Applications*. https://doi.org/10.1007/s11036-019-01214-w.

6. Al-Kasassbeh, M., Almseidin, M., Alrfou, K., & Kovacs, S. (2020). Detection of IoT-botnet attacks using fuzzy rule interpolation. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *39*(1), 421-431. https://doi.org/10.3233/jifs-191432.

7. Kouicem, D. E., Bouabdallah, A., & Lakhlef, H. (2018). Internet of things security: A top-down survey. *Computer Networks*, *141*, 199-221. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.03.012.

8. Kerimkhulle, S., Dildebayeva, Z., Tokhmetov, A., Amirova, A., Tussupov, J., Makhazhanova, U., Adalbek, A., Taberkhan, R., Zakirova, A., & Salykbayeva, A. (2023). Fuzzy logic and its application in the assessment of information security risk of industrial internet of things. *Symmetry*, *15*(10), 1958. https://doi.org/10.3390/sym15101958.

9. Roman, R., Zhou, J., & Lopez, J. (2013). On the features and challenges of security and privacy in distributed internet of things. *Computer Networks*, *57*(10), 2266-2279. https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.12.018.

10. Kerimkhulle, S., Dildebayeva, Z., Tokhmetov, A., Amirova, A., Tussupov, J., Makhazhanova, U., Adalbek, A., Taberkhan, R., Zakirova, A., & Salykbayeva, A. (2023b). Fuzzy logic and its application in the assessment of information security risk of industrial internet of things. *Symmetry*, *15*(10), 1958. https://doi.org/10.3390/sym15101958.

11. Al-Khafajiy, A., Hussain, A., Baker, T., Aslam, N., & Alazab, M. (2025). A hybrid deep learning-based risk assessment model for securing the Internet of Things. *Computers & Security, 140,* Article 103419. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167404825001452.

12. Nurse, J. R. C., Radanliev, P., Creese, S., & De Roure, D. (2018b). If you can't understand it, you can't properly assess it! The reality of assessing security risks in Internet of Things systems. У *Living in the internet of things: Cybersecurity of the* IoT - *2018*. Institution of Engineering and Technology. https://doi.org/10.1049/cp.2018.0001.

13. Alaba, F. A., Othman, M., Hashem, I. A. T., & Alotaibi, F. (2017). Internet of Things security: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, *88*, 10-28. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.04.002.

14. Pal, S., Khalifa, S., Miller, D., Dedeoglu, V., Dorri, A., Ramachandran, G., Moghadam, P., Kusy, B., & Jurdak, R. (2024). Uncertainty propagation in the internet of things. *Discover Internet of Things*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/s43926-024-00085-2.

15. Ibrahim Abdul Abdulrahman, Gabriel Tosin Ayodele, Grace Efahn Egbedion, Jacob Alebiosu, Ezeagba Jetta Somtochukwu & Omotolani Eniola Akinbolajo. (2025). Securing Internet of Things (IoT) ecosystems: Addressing scalability, authentication, and privacy challenges. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, *26*(1), 523-534. https://doi.org/ 10.30574/wjarr.2025.26.1.0999.

16. Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, *7*(1), 1-13. https://doi.org/10.1016/ s0020-7373(75)80002-2.

Отримано 03.07.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.2

Yuriy Pidlisnyi

Postgraduate student of the Department of Cybersecurity and Mathematical Modeling
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: ypodlesny@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0001-9783-3898. **ResearcherID:** LSL-1170-2024

FUZZY LOGIC IN IOT SECURITY RISK ASSESSMENT: RULE CONSTRUCTION AND IMPLEMENTATION

This paper presents a context-aware model for information-security risk assessment in Internet-of-Things (IoT) environments, built on Mamdani-type fuzzy logic. Unlike traditional deterministic schemes, the model couples device-level attributes with operational context, enabling robust reasoning over incomplete, vague, and conflicting evidence typical of dynamic IoT networks. The input space comprises device vulnerability, function criticality, and protection of the communication channel; additionally, the device's role in the topology, access type, and deployment environment (household, industrial, medical) are considered during rule design. Expert knowledge is formalized as a coherent base of 27 fuzzy IF–THEN rules. Inference follows the Mamdani pipeline with AND = min, OR = max, implication = min, aggregation = max, and centroid defuzzification. The implementation in MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) normalizes linguistic variables to [0, 10] and uses triangular and trapezoidal membership functions to ensure smooth term transitions.

Validation was performed on a simulated fragment of a heterogeneous IoT network (sensors, controllers, gateways, processing nodes) with varied access patterns and channel protection levels. The results exhibit continuous risk surfaces and smooth transitions between risk levels, avoiding the staircase effects inherent to discrete matrices. A representative case shows that a processing node with critical functions and a partly protected channel is rated High (~7.3) by the fuzzy model, whereas EBIOS categorizes it as Critical, yielding finer prioritization for resource-aware response while remaining consistent in clearly low/high scenarios. The approach preserves explainability via linguistic rules, tolerates missing or imprecise inputs, and is suitable for integration with edge/gateway monitoring to support automated, real-time risk analysis.

The proposed model can serve as a foundation for adaptive risk-assessment systems in dynamic and safety-critical IoT settings. Future work includes enriching the input features with threat-intelligence signals, modeling temporal decay of evidence, and federated aggregation of local risk estimates for large-scale deployments.

Keywords: *Internet of Things (IoT); risk assessment; fuzzy logic; Fuzzy Logic Toolbox; Mamdani; information security; EBIOS.*

Fig.: 5. Table: 3. References: 16.

Підлісний Ю. І. Нечітка логіка в оцінюванні ризиків безпеки IoT: побудова правил і реалізація. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 237-253. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-237-253.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-254-260
УДК 004.942:004.7

Анна Миколаївна Усік[1], Володимир Вікторович Казимир[2]

[1]асистент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: usik18@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4965-6863. **ResearcherID:** E-2911-2019

[2]доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖЕВОГО НЕЙТРАЛІТЕТУ В ЕКОСИСТЕМІ IOT

У статті розглянуто проблему мережевого нейтралітету в екосистемі Інтернету речей (IoT). Запропоновано імітаційну модель IoT-системи, що враховує пріоритетність трафіку різних типів користувачів та пристроїв. Модель реалізовано в системі EMS із використанням даних реальної корпоративної мережі на основі маршрутизаторів Mikrotik. Отримані результати дозволяють оцінити вплив пріоритизації на якість обслуговування IoT-пристроїв і доводять необхідність збереження мережевого нейтралітету для стабільного функціонування IoT-екосистем.

Ключові слова: *IoT; екосистема; моніторинг; корпоративна мережа; глобальна мережа; імітаційне моделювання; EMS; Mikrotik.*

Рис.: 6. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Розвиток Інтернету речей (Internet of Things, IoT) є одним із ключових напрямів цифрової трансформації сучасного суспільства та промисловості. У контексті Індустрії 4.0 саме IoT формує основу інтеграції фізичного та віртуального світів, забезпечуючи взаємодію пристроїв, користувачів і сервісів у єдиному інформаційному середовищі. Сучасні IoT-системи поєднують тисячі сенсорів і виконавчих пристроїв, які генерують різнорідний трафік і працюють у розподілених мережевих умовах.

Однією з ключових проблем розвитку таких систем є порушення мережевого нейтралітету (Network Neutrality, NN) — рівномірності доступу різних типів трафіку до мережевих ресурсів. Нерівномірний розподіл пропускної здатності призводить до зниження якості сервісів, затримок у передачі даних, погіршення надійності зв'язку між IoT-пристроями. Це особливо критично для систем реального часу – «розумних будинків», промислових IoT або кіберфізичних систем, де пріоритет трафіку безпосередньо впливає на стабільність функціонування всієї екосистеми [1].

З огляду на це, актуальним є створення математичних та імітаційних моделей, що дозволяють досліджувати вплив мережевого нейтралітету на ефективність функціонування IoT-систем і забезпечувати справедливий розподіл мережевих ресурсів. Такі дослідження мають вагоме значення для галузей комп'ютерних наук, телекомунікацій, інформаційних технологій та кіберфізичних систем, де важливим є підвищення якості обслуговування (QoS) та забезпечення рівного доступу до інтернет-інфраструктури [2].

Таким чином, тема дослідження є актуальною з погляду як наукового моделювання мережевих процесів, так і практичної оптимізації роботи сучасних IoT-екосистем, що розвиваються в умовах глобальної цифровізації [3].

Постановка проблеми. З розвитком Інтернету та технологій постає важливе питання щодо мережевого нейтралітету (net neutrality, скорочено NN), крім цього, увагу багатьох привертає перехід від NN до NNN (non-net neutrality) [4].

Проблема пріоритетності при передачі даних в IoT-середовищі є критичною, особливо в інфраструктурах реального часу. У цій роботі продемонстровано підхід до дослідження цього явища на прикладі системи «розумного будинку» (рис. 1), використовуючи імітаційне моделювання в середовищі EMS та апаратні засоби маршрутизації Mikrotik.

© А. М. Усік, В. В. Казимир

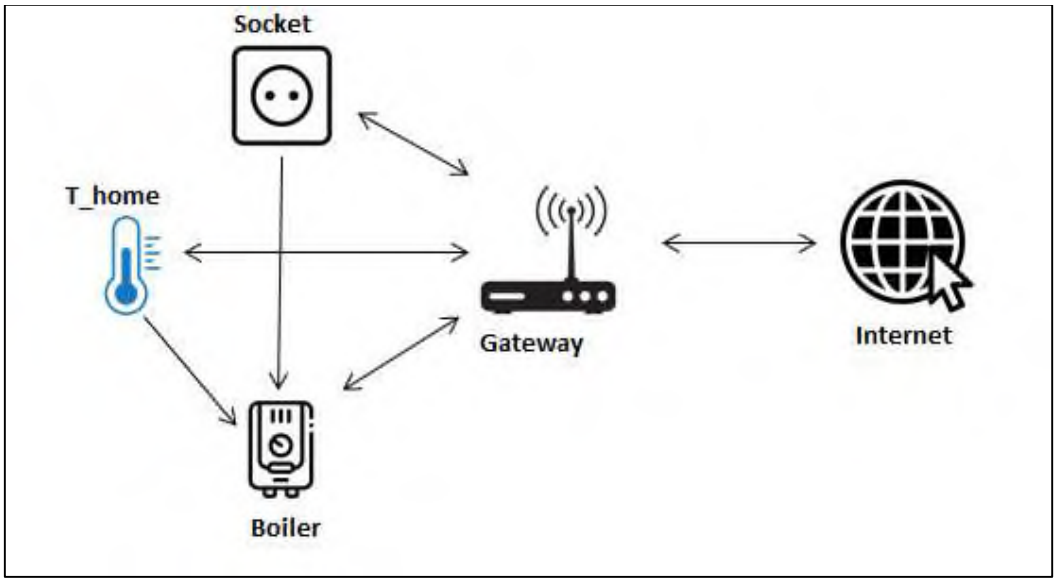


Рис. 1. Графічна модель розумного будинку

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання організації трафіку, QoS і нейтралітету в IoT-мережах досліджувалися вітчизняними та зарубіжними вченими, зокрема Mazhelis O., Luoma E., Warma H., Krämer J., Wiewiorra L., Weinhardt C. та ін.

В останні роки дослідники активно досліджують різні аспекти трафіку в IoT-системах, включно з його моделюванням, класифікацією і міжмережевою взаємодією. Так, у роботі [5] представлено генератор синтетичного IoT-трафіку та застосовано методи машинного навчання (Random Forest, KNN) для класифікації пристроїв за типами трафіку. Автори також використовують аналіз ентропії для підвищення безпеки переданих даних – цей підхід корисний як орієнтир при побудові моделей трафіку в IoT-екосистемах.

Інша важлива робота [6] зосереджена на задачі мережевого рівня інтероперабельності між технологіями Device-to-Device у IoT: запропоновано рішення на мережевому шарі, що дозволяє пристроям із різними протоколами й режимами координуватися без втрат продуктивності. Хоча ця робота не прямо стосується пріоритизації трафіку чи нейтралітету, вона демонструє складнощі узгодження мережевих протоколів у гетерогенних IoT-середовищах, що є релевантним фоном для вашого дослідження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість робіт, присвячених оптимізації IoT-трафіку, питання впливу мережевого нейтралітету на ефективність взаємодії пристроїв залишається недостатньо дослідженим.

Більшість IoT-систем (наприклад, «розумні будинки» або промислові комплекси) генерують неоднорідний, асиметричний трафік, який не має пріоритету порівняно з іншими типами даних, але відіграє критично важливу роль у керуванні процесами.

Зовнішні фактори, такі як нерівнозначний доступ до мережевих ресурсів, обмеження пропускної здатності та пріоритизація пакетів, досі залишаються малодослідженими в контексті IoT-систем.

Мета дослідження. У цій роботі пропонується взяти EMS як основу для розробки імітаційної моделі з урахуванням пропускної здатності, інтенсивності сигналу та об’єму пакету інформації, що передається.

Розроблена модель покликана забезпечити кількісну оцінку впливу мережевого нейтралітету на ефективність функціонування IoT-систем та дослідження можливостей оптимізації розподілу мережевих ресурсів у гетерогенному середовищі.

Система EMS призначена для формалізованого опису складних стохастичних дискретних систем, автоматизованого створення та дослідження програмних імітаційних моделей, а також оцінки ефективності реальних систем на етапах проєктування чи вдосконалення.

Її архітектура ґрунтується на формальному апараті Е-мереж та ієрархічному агрегатному підході, що дає змогу відображати як структуру, так і поведінку системи в наочній графічній формі. EMS також має зручний вебінтерфейсу, який дозволяє географічно віддаленим користувачам одночасно працювати над спільною моделлю.

Е-мережі забезпечують не лише моделювання потоків управління, а й потоків даних із можливістю кількісної обробки на переходах мережі. Це дає змогу реалізовувати маршрутизацію процесів і складну логіку взаємодії між компонентами моделі, що перевищує можливості традиційних мережевих методів.

Типи переходів у Е-мережах:

- T–перехід («виконання роботи») – спрацьовує при наявності мітки у вхідній позиції та відсутності її у вихідній;
- F–перехід («розгалуження шляхів») – активується при наявності мітки у вхідній позиції та відсутності її у вихідних;
- J–перехід («злиття шляхів») – спрацьовує при наявності міток в обох вхідних позиціях;
- X–перехід («перемикач альтернатив») – напрям процесу визначається значенням вирішальної процедури R;
- Y–перехід («вибір») – використовується для опису умов продовження процесу у разі злиття декількох шляхів, зокрема для відображення зворотних зв'язків [7].

Завдяки цим переходам обчислювальний процес у EMS керується не програмним кодом, а самими даними, що створює саморегульований режим роботи моделі. Такий підхід забезпечує функції контролю, трасування та підвищує надійність виконання моделювання.

Виклад основного матеріалу. Імітаційна модель (ІМ) дозволяє реалізовувати процес при заданих значеннях його параметрів у результаті прогону моделі. Перевагою ІМ є можливість опису поведінки елементів складної системи на високому рівні деталізації, відсутність обмеження на вид залежностей між параметрами ІМ і станом зовнішнього середовища, можливість дослідження динаміки взаємодії елементів у часі і просторі системи, зробили імітаційне моделювання основним методом дослідження складних систем [7].

За рис. 1 побудуємо імітаційну модель розумного будинку (рис. 2). Проблема пріоритетності тут вирішується за допомогою переходів-черг, які знаходяться перед шлюзом, вони працюють як Т-переходи, тільки можуть накопичувати мітки.

Технології, побудовані за принципами IoT, стали невід'ємною частиною сучасних комп'ютерних мереж, як локальних, так і глобальних. Саме тому на їхню роботу активно впливає активність і обмін інформацією між класичними комп'ютерними системами в мережі Інтернет. Для того щоб врахувати ці зовнішні чинники на роботу систем IoT, таких як розумний будинок або розумне місто, потрібно провести аналіз та дослідження навантаження у реальних комп'ютерних мережах та за допомогою полунатурного моделювання – мережевих стендів.

Як основне джерело експериментальних даних обрано підприємство, що має велику кількість віддалених підрозділів та включає у свою структуру пристрої, які відповідають концепції IoT. Аналіз завантаження каналів центрального відділення показав, що найменшим періодом, який зберігає свої структурні особливості, є тиждень.

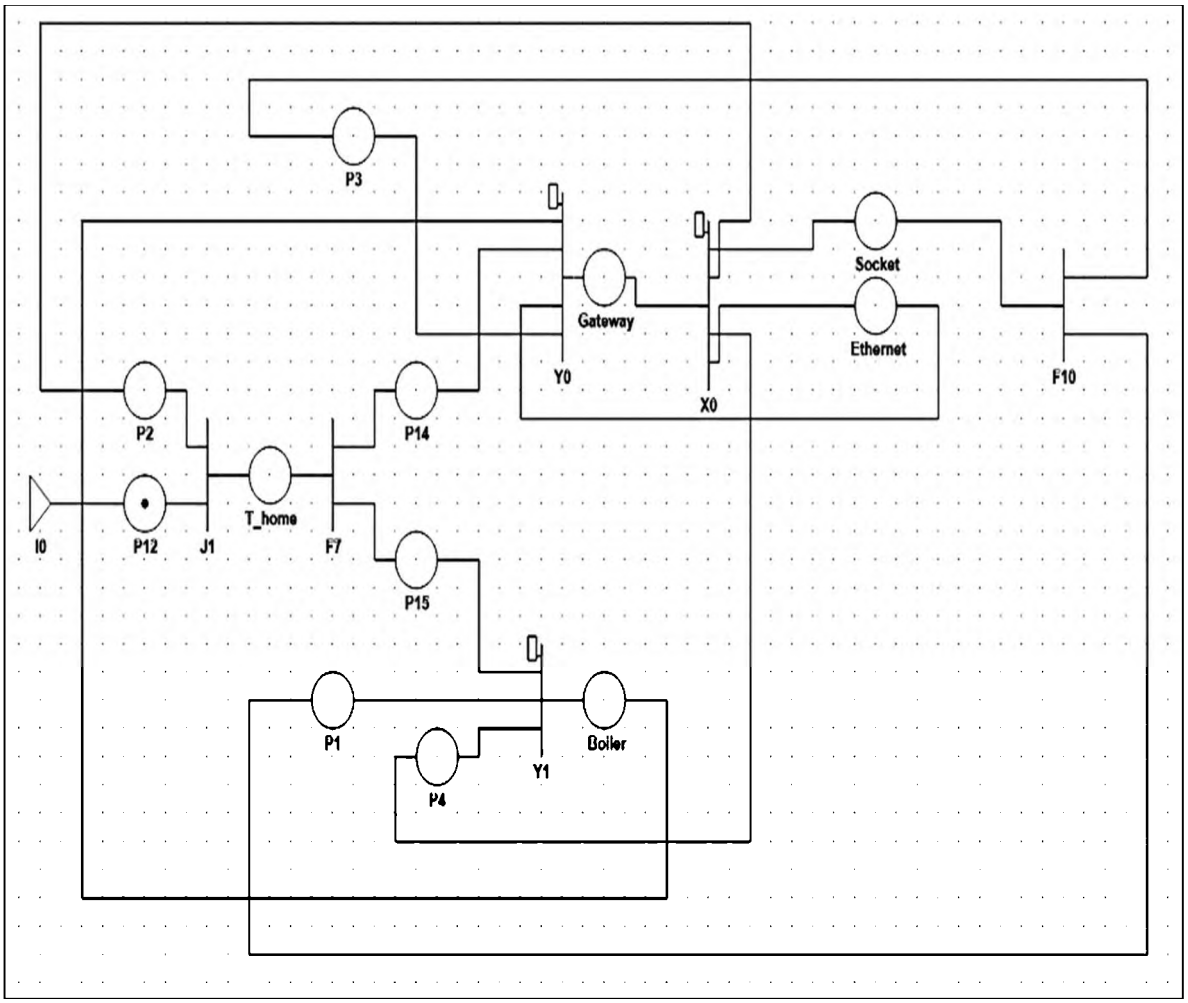


Рис. 2. Імітаційна модель

На рис. 3 наведено графік завантаження центрального каналу зв'язку протягом робочого тижня (з понеділка по п'ятницю).

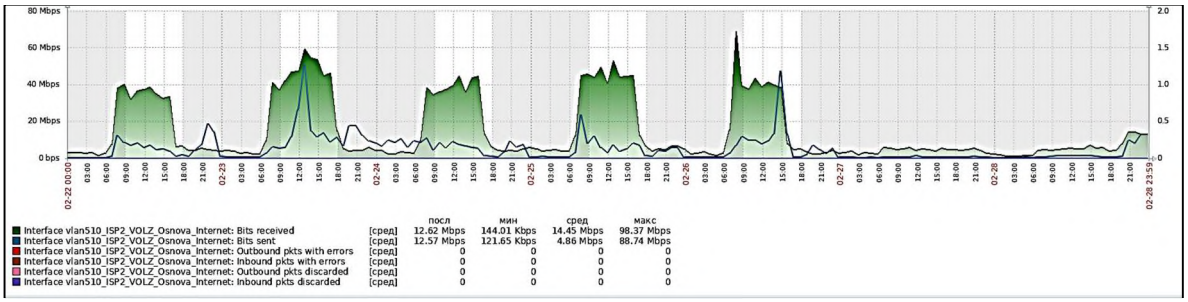


Рис. 3. Завантаження каналу Інтернет

Проаналізувавши отримані дані протягом тижня, можна зробити висновок, що суттєве навантаження, яке може вплинути на роботу системи IoT та комп'ютерної мережі загалом відбувається в робочий час з 6:00 до 18:00. Оберемо саме цей час для створення моделі поведінки комп'ютерної мережі, яку будемо використовувати для імітаційного моделювання.

Для того щоб побачити, що IoT пристрої незалежно від системи підприємства не впливають на завантаження каналів зв'язку, було зроблено вимірювання пропускної здатності каналів, до яких підключені IoT пристрої (рис. 4).

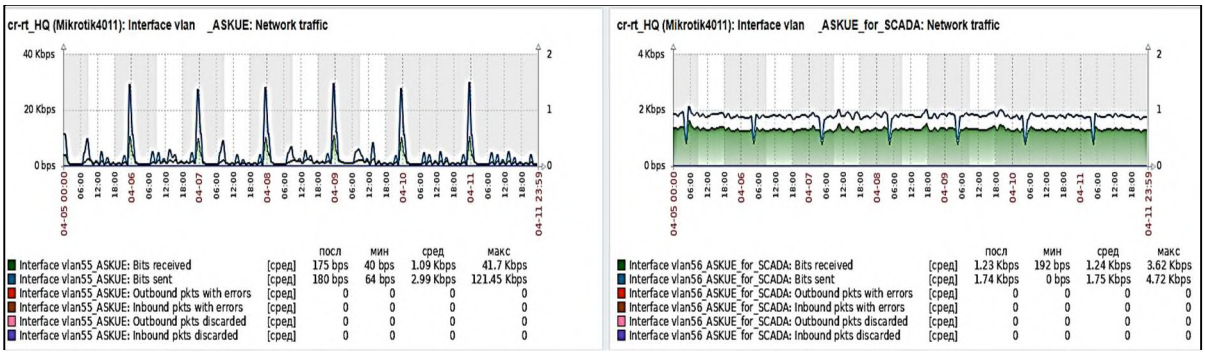
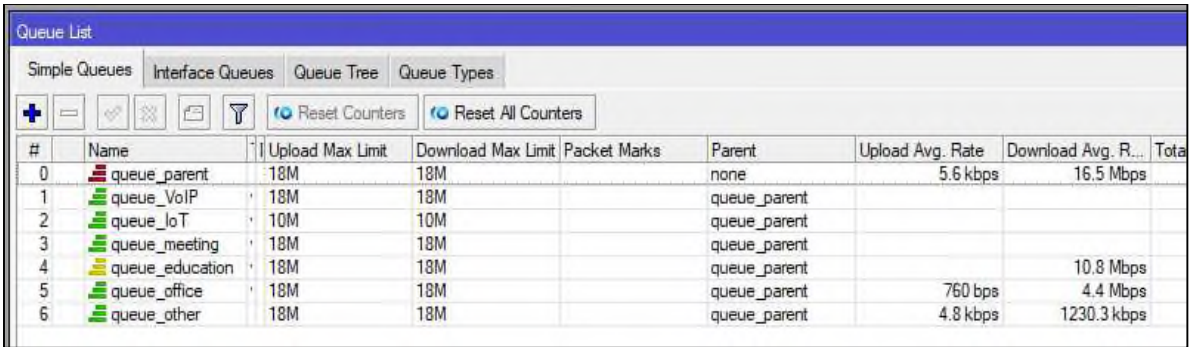


Рис. 4. Завантаження каналу IoT-пристроїв

Для мінімізації впливу трафіку абонентів на систему IoT налаштована пріоритизація трафіку. Черга пріоритетів має наступний порядок: VoiP, IoT, Users. У нашому випадку пріоритети налаштовані на маршрутизаторах за допомогою черг (рис. 5).



#	Name	Upload Max Limit	Download Max Limit	Packet Marks	Parent	Upload Avg. Rate	Download Avg. R...	Tota
0	queue_parent	18M	18M		none	5.6 kbps	16.5 Mbps	
1	queue_VoIP	18M	18M		queue_parent			
2	queue_IoT	10M	10M		queue_parent			
3	queue_meeting	18M	18M		queue_parent			
4	queue_education	18M	18M		queue_parent		10.8 Mbps	
5	queue_office	18M	18M		queue_parent	760 bps	4.4 Mbps	
6	queue_other	18M	18M		queue_parent	4.8 kbps	1230.3 kbps	

Рис. 5. Налаштування черг у маршрутизаторі Mikrotik

Таким чином, можна зробити висновки, що для аналізу впливу трафіку мережі на роботу IoT-системи слід створити розподілення, що відповідає графіку функції, наведеній на рис. 6. Особливість полягає у різкому збільшенні навантаження на канал зв'язку протягом першої години і поступовому збільшенні протягом робочого дня.

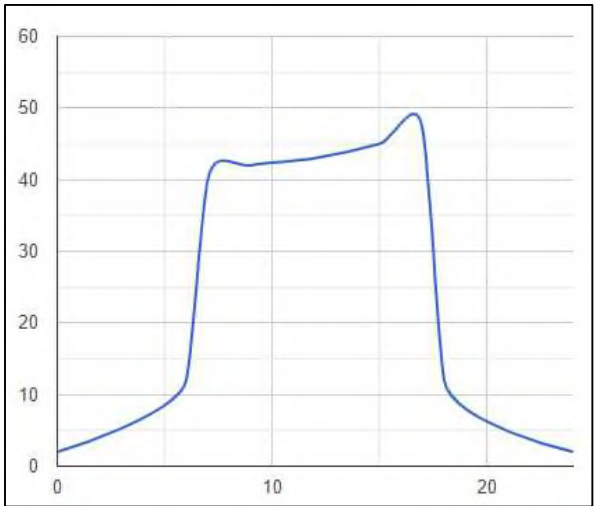


Рис. 6. Функція завантаження каналу зв'язку в робочий час

Математична залежність пропускної здатності каналів описується формулою:

$$f(x) = \{e^{\lambda x}\ x \in [0;6]\ \lambda x + 40\ x \in (6;17)\ e^{-\lambda(x-24)}\ x \in [17;24] \quad (1)$$

Висновки. Було проведено дослідження IoT-системи «розумний будинок», у межах якого розроблено імітаційну модель на базі EMS, що враховує пропускну здатність, інтенсивність сигналу та обсяг переданих даних.

Отримані результати підтвердили необхідність пріоритизованого обслуговування мережевих пристроїв, особливо в умовах підвищеного навантаження.

Розроблена модель дозволяє здійснювати кількісний аналіз впливу мережевого трафіку на продуктивність IoT-систем, а також прогнозувати оптимальні режими розподілу ресурсів.

Виведена математична залежність пропускної здатності каналів базується на емпіричних даних промислових IoT-систем і може бути використана для подальшого моделювання адаптивних механізмів керування трафіком у гетерогенних мережах.

Список використаних джерел

1. Yildiz, M. (n.d.). Introduction to IoT Ecosystem. Medium. Retrieved from https://medium.com/technology-hits/introduction-to-iot-ecosystem-25b359c8cf23.

2. Mazhelis, O., Luoma, E., & Warma, H. (2012). Defining an Internet-of-Things ecosystem. In S. Andreev, S. Balandin, & Y. Koucheryavy (Eds.), *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking: ruSMART NEW2AN 2012* (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7469, pp. 3-19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32686-8_1.

3. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). *Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm*. *Ad Hoc Networks, 56*, 122-140. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004.

4. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation cognitive maps for extended technology roadmapping in IoT. *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 244-248. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924225.

5. Сидоренко О. В., Агеєв Д. А. Аналіз та моделювання IoT-трафіку. *Вісник Харківського національного університету радіоелектроніки, 4,* 48-49. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/1c982a24-62bb-49af-9354-3a32051cf8d3.

6. Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of device-to-device communication technologies in Internet of Things (IoT). *Ad Hoc Networks, 57*, 52-62. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.06.011.

7. Казимир, В. В., & Посадська, А. С. (2016). Динамічна оцінка ризику виконання плану робіт методом імітаційного моделювання. *Технічні науки і технології: науковий журнал*, (3(5)), 113-122.

References

1. Yildiz, M. (n.d.). Introduction to IoT Ecosystem. Medium. https://medium.com/technology-hits/introduction-to-iot-ecosystem-25b359c8cf23.

2. Mazhelis, O., Luoma, E., & Warma, H. (2012). Defining an Internet-of-Things ecosystem. *In Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking* (pp. 1-14). Berlin, Heidelberg: Springer.

3. Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). Understanding the Internet of Things: Definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks, 56*, 122-140. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.12.004.

4. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation Cognitive Maps for Extended Technology Roadmapping in IoT. In *Proceedings of the 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)* (pp. 244-248). IEEE. https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924225.

5. Sydorenko, O. V., & Aheiev, D. A. (2025). Analiz ta modeliuvannia IoT-trafiku [Analysis and modeling of IoT traffic]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu radioelektroniky –Bulletin of Charkiw national University of Radio Electronics, 4,* 48-49. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/1c982a24-62bb-49af-9354-3a32051cf8d3.

6. Bello, O., Zeadally, S., & Badra, M. (2017). Network layer inter-operation of Device-to-Device communication technologies in Internet of Things (IoT). *Ad Hoc Networks, 57*, 52-62. https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.06.011.

7. Kazymyr, V. V., & Posadska, A. S. (2016). Dynamichna otsinka ryzyku vykonannia planu robit metodom imitatsiinoho modeliuvannia [Dynamic risk assessment of the work plan implementation using simulation modeling]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii – Technivcal Sciences and Technologies,* (3(5)), 113-122.

Отримано 20.09.2025

UDC 004.942:004.7

Anna Usik[1], Volodymyr Kazymyr[2]

[1]Assistant of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: usik18@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-4965-6863. **ResearcherID:** E-2911-2019

[2]Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

SIMULATION OF NETWORK NEUTRALITY IN THE IOT ECOSYSTEM

The development of modern network systems is one of the top priorities in today's IT field. The vast majority of new systems are network-based. One of the most promising directions is the Internet of Things (IoT), which offers numerous advantages and distinctive features compared to traditional centralized client–server architectures. The rapid evolution of IoT has become possible due to four technological trends: decreased cost of computing power, reduced telecommunication service rates, tapid growth in the number of connected devices, and advancement of cloud computing and Big Data technologies.

Modern networks are heterogeneous in terms of traffic types. One of the most pressing challenges in the development of future global and corporate systems is the prioritization and fairness of resource allocation, i.e., network neutrality. Inequality in bandwidth allocation complicates the operation of systems that generate less traffic but are equally critical. In global networks, this phenomenon is often reflected in the preferential treatment of traffic generated by large corporations.

Recent open-access publications addressing the use of IoT technologies have been reviewed, along with studies devoted to mathematical modeling of network systems. The central research problem involves analyzing network neutrality in the IoT ecosystem from both theoretical and practical perspectives. The IoT ecosystem can be defined as a specific type of business ecosystem that includes a group of organizations and individuals that simultaneously compete and collaborate.

The aim of the article is to study the interaction of different traffic types in the IoT ecosystem using mathematical and simulation modeling, as well as to analyze their impact on the quality of network performance. The proposed model was developed in the EMS simulation system.

The main part of the study presents and analyzes a simulation model of an IoT system based on practical data obtained from a corporate network built with heterogeneous equipment. The MikroTik router served as the main data collection point. The analysis of the proposed simulation model highlights the specific characteristics of IoT system construction and confirms the obtained results through experiments conducted on a real network.

Keywords: *IoT; ecosystem; monitoring; corporate network; global network; simulation; EMS; MikroTik.*

Fig.: 6. References: 7.

Усік А. М., Казимир В. В. Моделювання мережевого нейтралітету в екосистемі IOT. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 254-260. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-254-260.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-261-271
УДК 004.42:37.091.3:378.018.43

Андрій Васильович Хижняк[1], Володимир Вікторович Казимир[2]

[1]аспірант, старший викладач кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: alf.andrey@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0008-8655-3736

[2]доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

ДОМЕННО-ОРІЄНТОВАНА МОВА ОПИСУ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

У роботі представлений опис формальної граматики нової доменно-орієнтованої мови Learning Task Definition Language (LTDL), призначеної для опису структури, етапів, залежностей, параметризації та запуску і налаштування навчальних середовищ для виконання практичних завдань в інженерній освіті. Визначені особливості мови, сфера її застосування. Проведене тестування мови: парсинг тести, лексичне тестування, тестування генерації коду, побудова синтаксичного дерева, визначення непродуктивних та недосяжних символів. Показані можливості візуалізації завдання за допомогою графічного варіанту мови.

Ключові слова: *практичні завдання; автоматична генерація; автоматичне оцінювання; персоналізація навчання; формальна граматика; доменно-орієнтована мова.*

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Останніми роками зростає попит на масштабовані та персоналізовані освітні інструменти, спрямовані на підтримку автоматизації та академічної доброчесності. Особливо це актуально в розрізі практичних завдань, які служать наріжним каменем навчання студентів інженерних спеціальностей. Важливо, щоб завдання були структурованими, машиночитаними та параметризованими; ці аспекти забезпечуються формальним визначенням внутрішньої структури цих завдань [1]. Збалансованість практичних завдань може бути досягнута, наприклад, шляхом використання доменно-орієнтованої мови (DSL), за допомогою якої можна спростити розробку навчальних компонентів як викладачами при створенні методичних вказівок до лабораторних і практичних занять, так і студентами в процесі самостійного опанування навчального контенту.

Постановка проблеми. Спроби використати DSL в освітніх цілях фіксуються впродовж останніх років [2, 3, 4, 5, 6], однак розробка спеціалізованих мов для формалізації опису шаблонів практичних завдань залишається недостатньо розвиненою. Існуючі DSL мають обмежений функціонал, іншу направленість та низку концептуальних і технологічних недоліків щодо опису типів завдань, способів перевірки, рівнів складності, контекстів виконання тощо.

Аналіз останніх джерел і публікацій. У роботі [2] розроблено DSL для автоматизованого створення та налаштування віртуальних класів у рамках LMS. Вона забезпечує високий рівень абстракції та візуальність за рахунок використання графічного режиму в рамках Eclipse Graphical Modeling Framework і дозволяє викладачам створювати класи схематично. Ця мова має низку концептуальних і технологічних обмежень: тісно пов'язана з конкретною платформою, спрямована на структурування середовища навчання, але не моделює сам зміст завдань, не передбачено адаптивних механізмів і не придатна для складних сценаріїв. У роботі [3; 4] представлена нова вбудована домен-специфічна мова EDSL. Ця мова є центральним елементом фреймворку, призначеним для опису параметризованих завдань для курсу з програмування на Haskell-I/O та їх правильних рішень. Автори вказують на наявні обмеження та недоліки: залежність від якості генераторів специфікацій, які повинні бути надані викладачем, ризик створення нерозв'язних завдань, а система генерації тестів стикається з проблемами застрягання при пошуку тестів. Quiz-game DSL представлена в роботі [5] для створення вікторин/освітніх

© А. В. Хижняк, В. В. Казимир, 2025

ігор і дозволяє описати структуру вікторини: запитання, рівні складності, логіку, але сфокусована лише на вікторинах – не підтримує складні сценарії, симуляції, інтеракції зі складною логікою. У роботі [6] представлено генератор питань, який використовує власну легку вбудовану домен-специфічну мову для опису шаблонів питань, ключовою особливістю якої є можливість параметризації аспектів питань, визначення діапазонів їх значень та потенційних взаємодій чи залежностей між ними, що дозволяє генерувати цілі родини схожих питань, але якість залежить від розробника, а не генератора. Сама мова має дуже обмежений функціонал і підходить тільки для запитань з однією відповіддю в рамках тільки однієї LMS.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на доцільність запропонованих рішень, вони мають низку концептуальних і технологічних обмежень їх застосування для гнучкої генерації персоналізованих практичних завдань. Існуючі рішення мають такі спільні обмеження, як: залежність від конкретної платформи, недостатня підтримка формального опису логіки перевірки, орієнтація переважно на макрорівень (курси, ресурси), а не мікрорівень (структура і зміст завдань), відсутність механізмів адаптації до опису практичних завдань.

З погляду на це, дуже перспективним є створення доменно-специфічної мови, яка забезпечить викладачів формальним і гнучким інструментом для створення персоналізованих практичних завдань, підтримуватиме контрольовану генерацію тексту завдання та розгортання навчального середовища, міститиме правила для автоматичної перевірки прогресу виконання завдання і може бути використана в сучасних інформаційних системах автоматизованої генерації та перевірки параметризованих практичних завдань [7].

Мета статті. Метою статті є опис формальної граматики доменно-орієнтованої мови Learning Task Definition Language та представлення результатів її тестування.

Виклад основного матеріалу.

1. Опис домену персоналізованих практичних завдань.

Практичне завдання (task) направлене на розвиток або перевірку навичок студента з певної теми. Для створення завдання треба розуміти, яка саме мета чи основна ідея закладена у виконання цього завдання, а головне, яка ціль повинна бути досягнута під час виконання завдання. Частіше за все ціллю має бути конкретний стан навчального середовища або об’єкт, існування якого можна в подальшому перевірити.

Можлива ситуація, коли для досягнення загальної мети практичного завдання потрібно виконати більше, ніж один етап (stage). Тоді для кожного етапу треба мати ціль, досягнення якої підтверджує виконання етапу і яку можна перевірити. Етап може мати окрему мету, а може бути кроком для досягнення основної. Кожен етап має свій створений об’єкт, запущений процес або конкретний стан навчального середовища. Етапи можуть бути залежними від інших етапів. Етапи, які повинні бути виконані послідовно і тільки в певному порядку, для зручності варто згрупувати в окрему сутність – трек (track). Наприклад, для виконання задачі за допомогою програми на мові С студенти повинні написати код програми, скомпілювати вихідні коди, запустити програму.

Параметризація дозволяє автоматично генерувати різні варіанти одного і того ж завдання, змінюючи певні його елементи. Для цього треба виділити частини, які потребують персоналізації для кожного етапу: імена змінних, назви файлів або директорій, ім’я користувача, функцій, порядок параметрів тощо. Таким чином, для кожного студента буде згенеровано унікальне завдання, яке за дидактичною складністю не буде відрізнятися від завдань інших студентів. Такі частини завдання іменуються параметризованими змінними (variables).

Важливою частиною завдання є метаінформація, яка може бути використана поза межами самого завдання для розуміння, кому і коли це завдання можна видавати, скільки часу орієнтовно повинно займати його виконання.

Для виконання практичного завдання зазвичай треба розгортати окреме навчальне середовище. Для розгортання навчального середовища потрібно створити Learning Environment deployment instructions, за допомогою яких відповідний модуль системи зможе розгорнути навчальне середовище. Ці інструкції поділяються на інструкції запуску (create instructions) середовища та інструкції налаштування середовища (provision instructions). У цих інструкціях використовуються додаткові параметри, які є персоналізованими змінними для завдання. Також додатково вказується, який саме тип навчального середовища треба запустити: який backend буде використовуватися, протокол доступу до навчального середовища та його параметри.

2. Розробка формальної граматики Learning Tasks Definition Language (LTDL).

Розробка LTDL здійснювалась згідно із принципів, закладених в [8, 9, 10, 11].

Формальною породжувальною граматикою (генеративною граматикою, граматикою з фразовою структурою, граматикою з переписуванням) називають кортеж [12]:

$$G = (N, T, P, S),$$

де N – множина нетермінальних символів (нетерміналів, змінних);

T – множина термінальних символів (терміналів, основних символів);

$N \cap T = \emptyset$; P – множина правил виведення (продукцій, правил підстановки) $\{(\alpha, \beta)\}$;

S – початковий символ (стартовий символ, аксіома). Початковим символом є task.

Введемо алфавіт нетермінальних символів для опису сутностей персоналізованого практичного завдання: TC – вміст завдання, LE – середовище навчання, LEC – його вміст, CI – інструкції створення навчального середовища, PI – інструкції налаштування навчального середовища, V – параметризована змінна, TR – послідовність етапів завдання, TRC – вміст послідовності, ST – етап послідовності, STC – вміст етапу, I – інструкція або дія, яку треба виконати в навчальному середовищі, A – сама дія, D – визначення та опис завдання, C – перевірка та фіксування результатів етапу. Доповнимо алфавіт допоміжними нетерміналами, які задають списки сутностей: VL, TRL, STL, DL, CL, IL. Алфавіт термінальних символів складається з набору зарезервованих слів під кожну сутність ("task", "learning_environment", "create_instructions", "provision_instructions", "variable", "track", "stage", "instruction", "definition", "check"), знаків пунктуації ("=", "{", "}", "[", "]", ":", ",", "$", ".") та загальної буквено-цифрової послідовності (string_literal).

Правила виведення граматики представлені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Правила виведення граматики (синтаксис мови)

№	Правило	Зміст правила
1	2	3
1	S → "task" string_literal ":" "{" TC "}"	Створення сутності практичного завдання з іменем.
2	TC → LE | "stages" "=" "["STL"]" | "tracks" "=" "["TRL"]" | "variables" "=" "[" VL "]"	Завдання може складатися з опису навчального середовища (НС) та списків: етапів, послідовностей етапів, змінних.
3	LE → "learning_environment" string_literal ":" "{" LEC "}"	Створення сутності НС з іменем.
4	LEC → VL | CI | PI	НС складається зі списків: змінних, інструкцій створення та налаштування.
5	CI → "create_instructions" "=" "[" IL "]"	Створення списку інструкцій створення НС.
6	PI → "provision_instructions" "=" "[" IL "]"	Створення списку інструкцій налаштування НС.

Закінчення табл. 1

1	2	3
7	IL → I | I "," IL	Список інструкцій може складатися з однієї інструкції або списку інструкцій, розділених комою.
8	I → "instruction" string_literal ":" "{" A "}"	Створення інструкції з іменем.
9	A → "action" "= " (string_literal | "$" | ".")	Безпосередня дія, яка є послідовністю звичайних символів або спеціальною послідовністю для інтерполяції значення змінної у вигляді: $scope.name.
10	TRL → TR | TR "," TRL	Список послідовностей може складатися з однієї послідовності або декількох послідовностей, розділених комою.
11	TR → "track" string_literal ":" "{" TRC "}"	Створення послідовності з іменем.
12	TRC → "stages" "=" "[" STL "]" | "variables" "=" "[" VL "]"	Послідовність складається зі списків: змінних та етапів.
13	STL → ST | ST "," STL	Список етапів може складатися з одного етапу або декількох послідовностей, розділених комою.
14	ST → "stage" string_literal ":" "{" STC "}"	Створення етапу з іменем.
15	STC → "variables" "=" "[" VL "]" | "definitions" "=" "[" DL "]" | "checks" "=" "["CL"]" | "preconditions" "=" "[" IL "]"	Етап складається зі списків: змінних, визначень, перевірок, інструкцій.
16	VL → V | V , VL	Список змінних може складатися з однієї змінної або декількох змінних, розділених комою.
17	V → "variable" string_literal ":" "{" "}"	Створення змінної з іменем.
18	DL → D | D "," DL	Список визначень може складатися з одного визначення або декількох визначень, розділених комою.
19	D → "definition" string_literal ":" "{" "}"	Створення визначення та опису з іменем.
20	CL → C | C "," CL	Список перевірок може складатися з однієї перевірки або декількох перевірок, розділених комою.
21	C → "check" string_literal ":" "{" A "}"	Створення перевірки з іменем.

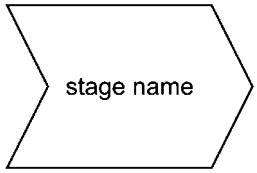
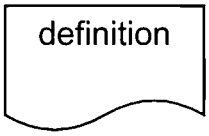
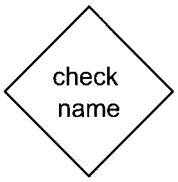
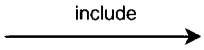
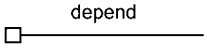
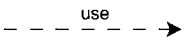
Джерело: розроблено авторами.

Сутності персоналізованого практичного завдання представимо у таблиці 2 у вигляді графічних зображень символів мови. Повний перелік параметрів елементів не виводиться у графічному представленні, окрім параметра *name*, який призначений для відображення назви відповідного елементу.

Таблиця 2 – Графічні зображення символів алфавіту мови LTDL

Графічне представлення символу	Сутність	Опис
1	2	3
-	**task**	Це основна сутність і початкове правило граматики; включає в себе опис завдання, його метадані, змінні, треки і етапи, опис навчального середовища.
	**variable**	Задає параметризацію завдання для застосування у темплейті або інструкції. Змінна може бути рівня всього завдання, треку або етапу.
	**track**	Використовується для групування етапів, які залежать один від одного. Це лінійна послідовність виконання кроків, складається зі змінних та етапів.

Закінчення табл. 2

1	2	3
	**stage**	Описує один із етапів виконання завдання і складається зі змінних, попередніх умов, опису та перевірок. Попередні умови -– це список інструкцій, які треба виконати в екземплярі навчального середовища, перед тим як починається виконання завдання.
	**instruction**	Описує дію, яка повинна бути виконана для запуску індивідуального середовища або в ньому. Використовується в описі навчального середовища (**learning environment**) та в попередніх умовах етапу (**stage**).
	**definition**	Описує темплейт, який видається студенту перед тим, як він почне виконувати завдання і описує, що потрібно виконати в конкретному етапі (**stage**).
	**check**	Задає дії, які треба виконати для відстежування успішності виконання конкретного етапу (**stage**). Виконуються при підключенні до навчального середовища, залежно від протоколу.
	**learning environment**	Опис навчального середовища, в якому буде виконуватися завдання. Має параметри та інструкції по запуску і налаштуванню конкретного екземпляра навчального середовища.
	**include**	Тип зв'язку, який встановлює вкладеність однієї сутності в іншу – наприклад, етап є частиною треку.
	**depend**	Тип зв'язку, який встановлює залежність етапів один від одного.
	**use**	Тип зв'язку, який показує, де буде використана параметризована змінна.

Джерело: розроблено авторами.

Серед особливостей мови можна виділити наступні: відсутність лівої рекурсії, граматика підходить для LL-парсингу, має структуровану ієрархію (task → tracks → stages → preconditions/definitions/checks), підтримує інтерполяцію змінних через режими лексера, має типізовані значення, лексер використовує стек режимів для обробки рядків. Граматика дозволяє описувати складні навчальні сценарії із залежностями, перевірками та параметризацією через змінні. Для опису елементів домену було обрано синтаксис у вигляді патерну:

[модифікатори] ключове_слово ім'я [параметри] { тіло }.

Подібна структура використовується для опису сутностей у багатьох мовах програмування та конфігураційних мовах. Переваги цього патерну в тому, що він легко читається людьми, зручний для парсингу, дає чітку структуру для автоматичної генерації, дозволяє легко розширювати синтаксис модифікаторами та параметрами.

3. Тестування та оцінювання LTDL.

Для тестування створеної граматики та згенерованих лексичного та синтаксичного аналізатора було створено та проведено наступні тести: парсинг тести, лексичне тестування, тестування генерації коду, побудова синтаксичного дерева, визначення непродуктивних та недосяжних символів.

У межах тестування парсингу за допомогою мови Python створені парсинг тести на валідні конструкції та неправильний синтаксис. Для лексичного тестування граматики було проведено тестування токенізації, тести на спеціальні символи, граничні випадки, порожні файли, зайві пробіли та довгі вирази.

Для побудови дерева виводу граматики було виконано вивід завдання, в якому є параметризовані змінні, треки зі вкладеннями етапів та окремі етапи з перевірочною дією. Опис цього завдання представлено в лістингу 1.

```
task "complex_task": {
  variables = [  variable "topvar1": {
       type = "RandomString" }]
  tracks = [ track "t1": {
          stages = [ stage "stage1": {
                    checks = [check "check1": {action = "a1" }]},
                stage "stage2": {
                    checks = [ check "check2": {action = "a2"}]}]}]
```

Лістинг. 1. Опис практичного завдання з кількома етапами

Джерело: власна розробка.

У результаті синтаксичного та лексичного аналізу побудовано дерево виводу, представлене на рис. 1.

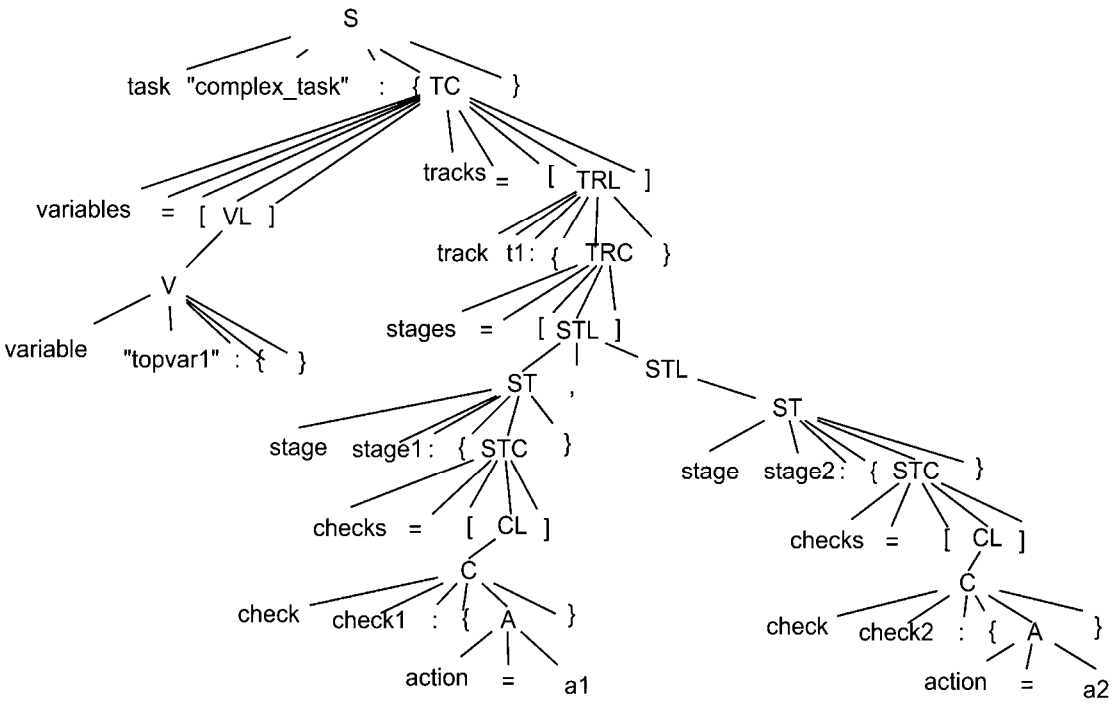


Рис. 1. Дерево виводу опису практичного завдання з кількома етапами

Джерело: власна розробка.

Окремим, але важливим елементом практичного завдання є опис навчального середовища, тому для нього теж було побудовано синтаксичне дерево. Для прикладу було створено опис навчального середовища, яке являє собою віртуальну машину, запущену за допомогою гіпервізора VirtualBox. Для налаштування середовища описані інструкції, які створюють користувача і задають йому пароль. Опис навчального середовища представлено в лістингу 2.

```
task "just_le" : { learning_environment "main": {
        variables = [  variable "login: {type = "RandomString" },
                       variable "pass: {type = "RandomString" }]
        create_instructions = [
                instruction "startvm": {
                        action = "VBoxManage startvm"}]
        provision_instructions = [
                instruction "create_user": {
                        action = "create user ${main_le.login}"},
                instruction "set_password": {
                        action = "echo  ${main_le.login} | passwd ${main_le.pass}" }]}}
```

Лістинг 2. Опис навчального середовища з кількома інструкціями

Джерело: власна розробка.

У результаті синтаксичного та лексичного аналізу побудовано дерево виводу, яке представлене на рис. 2.

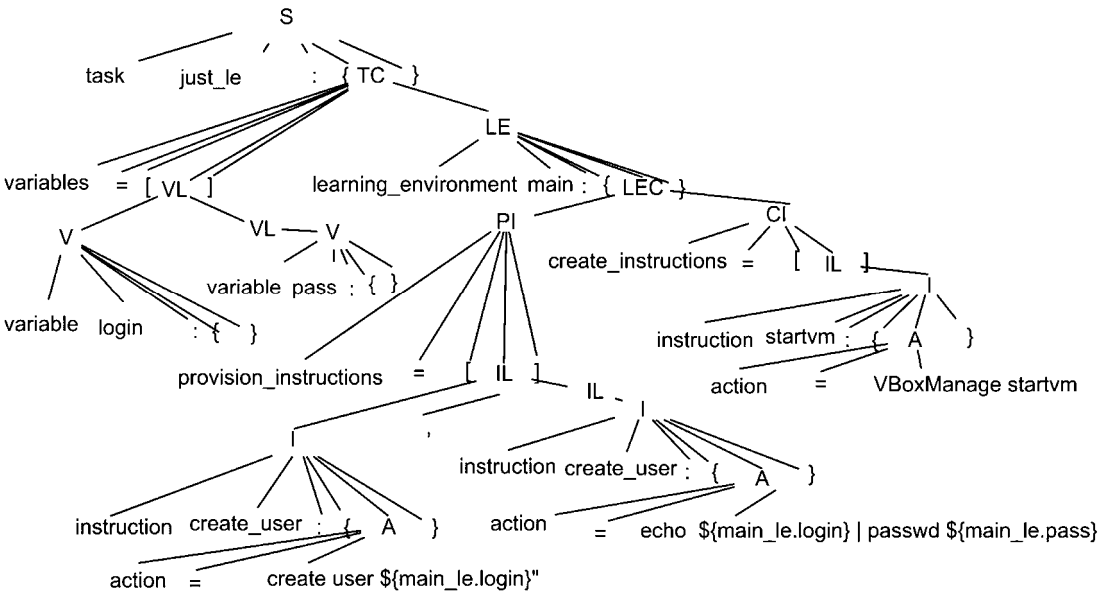


Рис. 2. Дерево виводу опису навчального середовища з кількома інструкціями за допомогою LTDL

Джерело: власна розробка.

Використовуючи алгоритми тестування граматики, які наведені у монографії [13], було проведено визначення непродуктивних та недосяжних символів. Символ A є продуктивним, якщо існує вивід $A \Rightarrow^* w$, де w – рядок термінальних символів. Символ A є непродуктивним, якщо не існує виводу $A \Rightarrow^* w$ для жодного рядка w, що складається лише з термінальних символів.

Після повного аналізу граматики виявляється, що множина непродуктивних символів є пустою множиною, і всі нетермінальні символи можуть вивести термінальні рядки. Це досягається завдяки:

1) Використанню оператора * для опціональних повторень;
2) Наявності альтернативних правил виводу;
3) Правильній структурі граматики без циклічних залежностей;
4) Можливості виводу мінімальних конструкцій для кожного правила.

Символ A є досяжним, якщо існує вивід $S \Rightarrow^* \alpha A \beta$, де S – стартовий символ, α і β – довільні рядки символів.

Символ A є недосяжним, якщо не існує виводу $S \Rightarrow^* \alpha A \beta$ для жодних α і β.

Граматика LTDL не містить недосяжних символів. Усі нетермінальні символи можуть бути досягнуті від стартового символа task через певну послідовність виводів.

Ключові особливості, які забезпечують досяжність всіх символів:

– Ієрархічна структура – граматика побудована як дерево з чітким корінням (task);
– Центральне правило – аксіома, що об'єднує всі основні блоки граматики;
– Взаємозв'язки – всі структури пов'язані через правила виводу;
– Відсутність ізольованих правил – немає правил, що не використовуються.

Це означає, що граматика не містить зайвих символів та всі визначені правила мають практичне застосування і можуть бути досягнуті під час парсингу.

4. Приклад представлення персоналізованого практичного завдання мовою LTDL.

Для демонстрації можливостей мови зроблений опис прикладу персоналізованого практичного завдання за допомогою LTDL нотації та графічним способом. У якості прикладу створимо завдання для вивчення команд роботи з файлами та директоріями в ОС на базі ядра Linux. У цьому завданні пропонується знайти файл, який містить наперед заданий текст, і скопіювати його в директорію. Перед тим, як копіювати знайдений файл, треба створити цільову директорію. Для ускладнення завдання і внесення елементів гейміфікації через пошук і усунення першопричини проблеми додаємо в файлову систему паразитний файл із таким самим іменем, як цільова директорія, що унеможливлює її створення. Отже, у завданні буде 4 етапи, розбиті на 2 треки, які можна почати виконувати паралельно, але є взаємозалежність: 1) перш ніж, як скопіювати файл, його треба знайти та створити директорію, 2) перш ніж, як створити директорію, треба видалити паразитний файл.

Також треба задати 3 параметризовані змінні – змінна "pattern" рівня етапу "find_file", яка буде використовуватися тільки в цьому етапі, змінна "file_name" рівня треку, яка буде використовуватися в обох етапах треку, і змінна "dir_name" рівня завдання, яка буде використовуватися в етапах обох треків. На цьому прикладі можна продемонструвати випадки, коли етап не містить опису завдання (етап створення паразитного файлу), але містить перевірочні інструкції. Таким чином студент повинен зрозуміти наявність перепони й усунути її, а результат виконання цієї дії повинен бути зафіксований в фінальному звіті про виконання завдання. Натомість етап створення файлу зі згенерованим текстом, який студент повинен знайти, не містить перевірочних умов, оскільки в результаті виконання цього етапу потрібний файл повинен опинитися в цільовій директорії, що і буде успішним виконанням цього етапу. Тільки так можна зрозуміти, що файл був знайдений. Іноді буває так, що правильні команди виконані, але студент не розібрався з результатом роботи команди.

Для спрощення сприйняття та можливості охоплення усіх аспектів розробленого персоналізованого практичного завдання авторами пропонується можливість графічного представлення елементів завдання. На рис. 3 показано, як наведений вище приклад візуалізується за допомогою графічного варіанту мови.

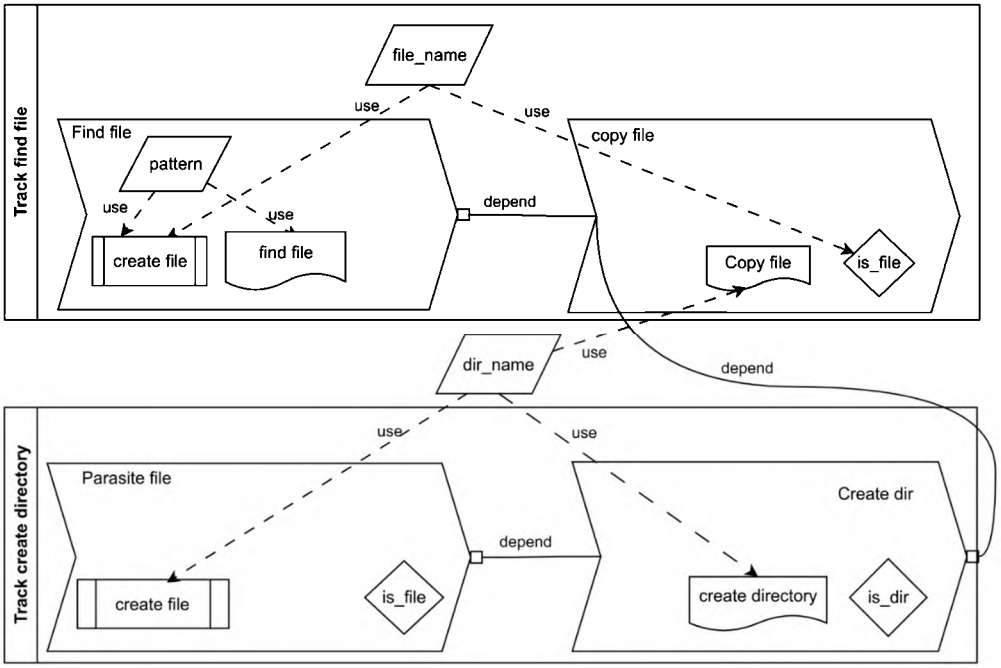


Рис. 3. Приклад представлення персоналізованого практичного завдання графічним варіантом мови LTDL

Джерело: власна розробка.

Висновки. У дослідженні вперше запропоновано формальну доменно-специфічну мову Learning Task Definition Language (LTDL), яка, на відміну від існуючих DSL-рішень, фокусується на мікрорівні завдань, глибокій параметризації, описі структури, залежностей, розгортанні навчальних середовищ та гнучких перевірках. Розроблена мова може поєднуватися з генеративними AI-системами для контрольованого процесу автоматичної генерації персоналізованих практичних завдань для інженерних спеціальностей.

Розроблена формальна граматика мови, проведене тестування створеної граматики та згенерованих лексичного та синтаксичного аналізатора, розроблене графічне представлення мови. Графічне представлення мови дозволяє викладачам охопити всі аспекти персоналізованого практичного завдання та спрощує його огляд та аналіз.

Подальші дослідження будуть спрямовані на:

1) інтеграцію LTDL у навчальні платформи та розробку методів оцінки ефективності застосування мови у реальних освітніх сценаріях;

2) підтримку конкретних рівнів персоналізації практичних завдань [14];

3) дослідження інтеграції LTDL з генеративними моделями для контрольованої автоматизації;

4) створення комбінованого підходу до персоналізації навчання завдяки поєднанню переваг формальної мови (структурованість, перевірюваність) та можливостей AI (масштабованість, варіативність).

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Автори використали ШІ (Chat GPT) для покращення читабельності та виправлення стилістичних і граматичних помилок у цій статті. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Liang, Percy & Jordan, Michael & Klein, Dan. (2010). Learning Programs: A Hierarchical Bayesian Approach. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10),* 639-646.

2. Jiménez, David & Guerrero, Ana-Elena & Prieto-Blazquez, Josep & Conesa, Jordi. (2014). A domain-specific language for Virtual Classrooms. *International Journal of Metadata Semantics and Ontologies*, *9,* 312-323. https://doi.org/10.1504/IJMSO.2014.065444.

3. Westphal, Oliver. (2020). A Framework for Generating Diverse Haskell-IO Exercise Tasks. *Pre-proceedings of the 28th International Workshop on Functional and Logic Programming (WFLP 2020)* https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.12751.

4. Westphal, Oliver & Voigtländer, Janis. (2020). Describing Console I/O Behavior for Testing Student Submissions in Haskell. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*,*321,* 19-36. https://doi.org/10.4204/EPTCS.321.2.

5. González García, Cristian & Núñez Valdez, Edward & Moreno Ger, Pablo & Gonzalez Crespo, Ruben & Pelayo García-Bustelo, B. & Cueva Lovelle, Juan. (2019). Agile development of quiz-based multiplatform educational games using a Domain-Specific Language. *Universal Access in the Information Society.* IP. 1-20. https://doi.org/10.1007/s10209-019-00681-y.

6. Willert, N., Thiemann, J. Template-Based Generator for Single-Choice Questions. (2024). *Tech Know Learn,* 29, 355-370. https://doi.org/10.1007/s10758-023-09659-5.

7. Хижняк, А.В., & Пріла, О.А. (2025). Розробка системи автоматизованої генерації та перевірки параметризованих практичних завдань. *Технічні науки та технології*, *(2 (40),* 221-233. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-221-233.

8. Wasowski, A., & Berger, T. (2023). Domain-Specific Languages: Effective Modeling, Automation, and Reuse. *Springer*.

9. Ramos-Díaz, J. G., Navarro, I., Silva, J., & Arroyo, G. (2012). Defining DSL design principles for enhancing the requirements elicitation process. *Acta* Universitaria*, 22,* 126-133. https://doi.org/10.15174/au.2012.352.

10. Strembeck, M., & Zdun, U. (2009). An Approach for the Systematic Development of Domain-Specific Languages. *Software: Practice and Experience* (*SP&E), 39(15)*, 1253-1292. http://dx.doi.org/10.1002/spe.936.

11. Mernik M., Heering J., Sloane A.M. (2005). When and how to develop domain-specific languages. *ACM Computing Surveys*. http://dx.doi.org/10.1145/1118890.1118892.

12. Стативка, Ю. І. (2023). *Формальні мови. Основні концепти і представлення*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. https://ela.kpi.ua/items/5f179fe8-05de-4b23-9563-13fd4d24e37e.

13. Гавриленко С.Ю. (2021). Формальні мови, граматики та автомати. НТУ ХПІ. https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5847efdd-6ff5-4f7f-9de8-6f6555ad4cc0/content.

14. Хижняк, А., & Казимир, В. (2025). Узагальнена класифікація рівнів персоналізації практичних завдань в іт- освіті. *Наука і техніка сьогодні, (7(48)).* https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-1932-1949.

References

1. Liang, Percy & Jordan, Michael & Klein, Dan. (2010). Learning Programs: A Hierarchical Bayesian Approach. *Proceedings of the 27th International Conference on Machine Learning (ICML-10), pp.* 639-646.

2. Jiménez, David & Guerrero, Ana-Elena & Prieto-Blazquez, Josep & Conesa, Jordi. (2014). A domain-specific language for Virtual Classrooms. *International Journal of Metadata Semantics and Ontologies*. 9. pp. 312-323. DOI: https://doi.org/10.1504/IJMSO.2014.065444.

3. Westphal, Oliver. (2020). A Framework for Generating Diverse Haskell-IO Exercise Tasks. *Pre-proceedings of the 28th International Workshop on Functional and Logic Programming (WFLP 2020)* DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.12751.

4. Westphal, Oliver & Voigtländer, Janis. (2020). Describing Console I/O Behavior for Testing Student Submissions in Haskell. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*. 321. 19-36. DOI: https://doi.org/10.4204/EPTCS.321.2.

5. González García, Cristian & Núñez Valdez, Edward & Moreno Ger, Pablo & Gonzalez Crespo, Ruben & Pelayo García-Bustelo, B. & Cueva Lovelle, Juan. (2019). Agile development of quiz-based multiplatform educational games using a Domain-Specific Language. *Universal Access in the Information Society.* IP. 1-20. DOI: https://doi.org/10.1007/s10209-019-00681-y.

6. Willert, N., Thiemann, J. Template-Based Generator for Single-Choice Questions. (2024). *Tech Know Learn* 29, 355-370. DOI: https://doi.org/10.1007/s10758-023-09659-5.

7. Khyzhniak A.V., Prila O.A. Rozrobka systemy avtomatyzovanoi heneratsii ta perevirky parametryzovanykh praktychnykh zavdan. [Designing a system for automated generation and automated assessment of parameterized practical assignments.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii - Technical sciences and technologies, Vol.2 (40)*, 2025. pp.221-233. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-221-233.

8. Wasowski, A., & Berger, T. (2023). Domain-Specific Languages: Effective Modeling, Automation, and Reuse. *Springer*.

9. Ramos-Díaz, J. G., Navarro, I., Silva, J., & Arroyo, G. (2012). Defining DSL design principles for enhancing the requirements elicitation process. *Acta Universitaria*, 22, pp. 126-133. DOI: https://doi.org/10.15174/au.2012.352.

10. Strembeck, M., & Zdun, U. (2009). An Approach for the Systematic Development of Domain-Specific Languages. *Software: Practice and Experience* (SP&E), 39(15), pp. 1253-1292. DOI: http://dx.doi.org/10.1002/spe.936.

11. Mernik M., Heering J., Sloane A.M. (2005). When and how to develop domain-specific languages. *ACM Computing Surveys*. DOI: http://dx.doi.org/10.1145/1118890.1118892.

12. Statyvka, Y. I. Formalni movy. Osnovni kontsepty i predstavlennia. [Formal language. Basic concepts and representations.] KPI im. Ihoria Sikorskoho – *Kyiv Polytechnic Institute named after Ihor Sikorskyi* – Available from: https://ela.kpi.ua/items/5f179fe8-05de-4b23-9563-13fd4d24e37e.

13. Havrylenko S.Y. (2021). Formalni movy, hramatyky ta avtomaty. [Formal Languages, Grammars, and Automata.] Textbook. Kharkiv: NTU KhPI. – 133 p. –Available from: https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5847efdd-6ff5-4f7f-9de8-6f6555ad4cc0/content.

14. Khyzhniak A.V., Kazymyr V.V. Uzahalnena klasyfikatsiia rivniv personalizatsii praktychnykh zavdan v it- osviti. [A generalized classification of personalization levels in practical assignments for IT-education.] *Nauka i tehnica syogodni – Science and technology today*, 7(48), 2025. pp.1932-1949. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-1932-1949. – Available from http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/26982/26951.

Отримано 08.09.2025

UDC 004.42:37.091.3:378.018.43

Andrii Khyzhniak[1], Volodymyr Kazymyr[2]

[1]PhD Student, Senior Lecturer at Information and Computer Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: alf.andrey@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0009-0008-8655-3736

[2]Doctor of Sciences, Professor, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: vvkazymyr@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8163-1119. **ResearcherID:** Q-2925-2016

A DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE FOR DESCRIBING PERSONALIZED PRACTICAL TASKS IN ENGINEERING EDUCATION

In contemporary education, there is a growing demand for scalable and personalized tools that can automate practical task creation, while preserving academic integrity.

An analysis of recent studies has shown that existing domain-specific languages (DSLs) used in an educational context have a number of limitations, are mostly focused on the macro level (courses, virtual classrooms, quizzes), and do not provide a formalized and flexible description of practical tasks at the micro level.

This article presents Learning Task Definition Language (LTDL) for the first time – a formal DSL designed to describe the structure of practical tasks and the stages of their implementation. The proposed language has a specific focus on the micro level of tasks, deep parameterization, description of learning environments, automatic generation, and flexible verification. LTDL supports both textual and graphical representations of tasks, which increases its usability for teachers and the possibility of integration with automatic deployment and verification systems.

Testing results demonstrate the correctness of LTDL grammar, the absence of unproductive and unreachable symbols, and the language's ability to model complex scenarios. The novelty of the research lies in the creation of a flexible formal tool that can combine task personalization with controlled generation of text instructions, automated deployment of learning environments, and rules for checking their progress. LTDL can be integrated into modern information systems for automated generation and evaluation of parameterized practical tasks.

Keywords: *practical assignments; automated generation; automated assessment; personalized learning; formal grammar; domain-specific language.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 14.

Хижняк А. В., Казимир В. В. Доменно-орієнтована мова опису персоналізованих практичних завдань для інженерних спеціальностей. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 261-271. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-261-271.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-272-283
УДК 004.415.5:004.8

Михайло Вікторович Хомчак

аспірант факультету комп'ютерних наук та технологій
Державний університет «Київський авіаційний інститут» (Київ, Україна)
E-mail: mykhailo.khomchak@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-4127-556X
ResearcherID: OMM-1519-2025

МОДЕЛЬ ВИБОРУ ХМАРНИХ СЕРВІСІВ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У сучасних умовах для великих підприємств вибір оптимальних хмарних сервісних платформ є критично важливим. Запропоновано модель вибору хмарних сервісів на основі інтеграції нечіткої логіки та еволюційних методів багатокритеріальної оптимізації. Завдання формалізовано як пошук Парето-оптимальних рішень у просторі семи критеріїв. Використано логіку Мамдані та еволюційні алгоритми багатокритеріальної оптимізації. Для подальшого ранжування застосовано нечіткий метод аналізу ієрархій, що враховує суб'єктивні переваги та дозволяє адаптувати модель до вимог підприємства.

Ключові слова: *хмарні технології; хмарні обчислення; вибір постачальника хмарних послуг; метод аналізу ієрархій; логіка Мамдані.*

Рис.: 1. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Сучасні підприємства стикаються зі складним завданням вибору оптимальних хмарних сервісних платформ (ХСП), які відповідають їхнім потребам у вартості, продуктивності, безпеці, масштабованості та інших критеріях. Ця проблема ускладнюється через нечіткість вимог, конфліктність критеріїв та відсутність єдиного оптимального рішення. Традиційні методи оптимізації [1], [2], [3] часто виявляються недостатньо гнучкими для врахування суб'єктивних уподобань та невизначеності, пов'язаної з оцінкою якості сервісів. У цій статті пропонується комбінований підхід, який інтегрує нечітку логіку для формалізації критеріїв та еволюційні алгоритми багатокритеріальної оптимізації для пошуку Парето-оптимальних рішень.

Постановка проблеми. Основна проблема полягає у відсутності універсального методу вибору ХСП, який би одночасно враховував численні конфліктні критерії, нечіткість експертних оцінок та динамічні вимоги підприємств. Наявні підходи часто обмежені жорсткою формалізацією або недостатньою адаптивністю до змінних умов. Крім того, більшість методів не забезпечують достатньої інтерпретованості результатів для осіб, які приймають рішення (ОПР), що ускладнює їх практичне застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання вибору хмарних сервісів досліджувалися в роботах таких авторів, як О. Є. Камінський [1], В. В. Нехай, К. М. Фокін [2], Chang R. S., Chang, E. Chen C., Dong H., Hsu C.L., Hussain F. K., Hussain O. K., Lee B. S., Liao C. S., Lin J. C. C., Liu C. Y., Mateos A., Padhy R.P., Patra M. R., Rosenberg J., Sun L., Yan S., Zhao G. [3-9] та ін. У цих дослідженнях розглядалися різні методи багатокритеріальної оптимізації, включаючи аналітичні підходи та евристичні алгоритми. У роботах [10] та [11] запропоновано використання нечіткої логіки для оцінки якості сервісів, але інтеграція з сучасними еволюційними алгоритмами [12-17] залишається недостатньо вивченою.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що більшість із них не враховують нечіткість критеріїв або обмежуються простими сценаріями вибору. Крім того, не використовуються переваги інтеграція з сучасними еволюційними алгоритмами.

Метою статті є розробка математичної моделі вибору хмарних сервісів для підприємств на основі нечіткої логіки та еволюційних методів багатокритеріальної оптимізації. Запропонований підхід має забезпечити формалізацію нечітких критеріїв оцінки ХСП, генерацію Парето-оптимальних рішень за допомогою алгоритмів NSGA-III та MOEA/D, побудову множини опорних рішень, що відображають уподобання ОПР.

© М. В. Хомчак, 2025

Виклад основного матеріалу. Задача вибору оптимального набору хмарних сервісів для великого підприємства формалізується як задача багатокритеріальної оптимізації з нечіткими функціями цілі.

Нехай $X = \{x_1, x_2, \dots x_n\} -$ множина потенційних конфігурацій хмарних сервісів, де $\{x_i\} -$ кожна конфігурація x_i являє собою комбінацію сервісів з різних підкатегорій (обчислення, зберігання, безпека тощо).

Потрібно знайти таке $x^* \in X$, яке оптимізує векторну функцію цілі з урахуванням нечіткості критеріїв:

$$x^* \in X: \mathbf{F}(x^*) = \big(f_1(x), f_2(x), \dots f_k(x)\big) - \text{Pareto} - \text{оптимум}, \qquad (1)$$

де $f_i(x) -$ функція оцінки за j-м критерієм;

$j = 1, \dots, k, k = 7$ –кількість критеріїв у задачі.

Розглянемо наступні сім критеріїв для задачі вибору оптимального набору хмарних сервісів для великого підприємства (або далі приймаємо наступну абревіатуру ХСП – Хмарні Сервісні Платформи): $f_1(x)$ – вартість ХСП (мінімізується); $f_2(x)$ – масштабованість ХСП (максимізується); $f_3(x)$ – продуктивність ХСП (максимізується); $f_4(x)$ – рівень безпеки (або безпека) ХСП (максимізується); $f_5(x)$ – надійність ХСП (максимізується); $f_6(x)$ – відповідність ХСП стандартам (максимізується); $f_7(x)$ – інтеграція ХСП з іншими сервісами (максимізується).

Зазначимо, що набір критеріїв $\{f_1(x), \dots, f_7(x)\}$ не є довільним. Він є результатом так званої таксономії ознак, про що йшлося у першому розділі роботи. Або факторного аналізу домену (в нашому випадку – характеристик хмарних сервісів, релевантних для підприємства). З погляду математичного моделювання, цей процес можна описати як побудову простору критеріїв $\mathbb{R}^k$, у якому кожен критерій відповідає окремому виміру (осьовому напряму) простору рішень.

Дамо формалізацію. Нехай $X \in \mathbb{R}^k -$ простір допустимих конфігурацій ХСП.

Тоді критерій $f_i: X \to \mathbb{R} -$ це функція, яка проєктує кожне рішення $x \in X$ на шкалу оцінки за j-м параметром. І, відповідно, тоді таксономія тут – це процедура класифікації та структурування характеристик системи за семантичними або функціональними групами, яка в нашій оптимізаційній моделі проявляється у вигляді вектора оцінювання.

Зазначимо, що в межах дослідження саме з математичної точки зору ми прагнемо, щоб:

- множина критеріїв була повною (тобто покривала всі суттєві аспекти ефективності ХСП);
- критерії були незалежними або слабо корельованими (тобто кожен критерій вносить у модель унікальну інформацію);
- додавання нових критеріїв не змінювало структуру Парето-фронту суттєво (тобто не приводило до домінування одного критерію над іншими).

Зазначимо, що у реальних умовах прийняття рішень у сфері ІТ, зокрема при виборі ХСП, рідко можна знайти чітко визначені та однозначні критерії ефективності. Більшість вимог замовників – таких як «висока безпека», «достатня масштабованість», «помірна вартість» – мають якісний, експертний або оцінковий характер. Ці характеристики не завжди можливо точно формалізувати через жорсткі числові межі, тому використання традиційної багатокритеріальної оптимізації з жорсткими функціями цілі може бути неадекватним для таких задач.

На нашу думку, нечітка логіка (fuzzy logic) [10], на відміну від класичної бінарної логіки, дозволяє нам у рамках задачі дослідження моделювати нечіткість, невизначеність і суб'єктивні уявлення експертів. Відповідно, кожен критерій описується не лише як числова функція $f_j(x)$, але і як функція належності $\mu_j(f_j(x))$, яка відображає ступінь задоволення підприємством певного критерію.

Наприклад, замість того, щоб вимагати, наприклад, «вартість не повинна перевищувати 5000 у.о.», в технічному завданні (ТЗ або договорі) можемо вказати так:

якщо вартість ≤ 4000 у.о. – це ідеально (ступінь належності 1);

якщо вартість між 4000 і 6000 у.о. – це допустимо (ступінь належності знижується від 1 до 0);

якщо вартість > 6000 у.о. – це неприйнятно (ступінь належності 0).

Це дозволяє враховувати гнучкі межі критеріїв, які можуть бути адаптовані до конкретної ситуації впровадження ХС на підприємстві.

Розглянемо декілька прикладів.

Формалізуємо критерій «вартість». Тоді маємо таку систему:

$$\mu_1\big(f_1(x)\big) = \begin{cases} 1, & f_1 \le 4000, \\ \dfrac{6000 - f_1(x)}{2000}, & 4000 < f_1 < 6000, \\ 0, & f_1 \le 6000. \end{cases}$$

У загальному випадку це можна описати так для кожного із критеріїв.

Критерій вартість ХСП.

$$\mu_1\big(f_1(x)\big) = \begin{cases} 1, & f_1(x) \le c_1, \\ \frac{c_1 - f_1(x)}{c_2 - c_1}, & c_1 < f_1(x) < c_2, \\ 0, & f_1(x) \ge c_2, \end{cases} \quad (2)$$

де $\mu_1\big(f_1(x)\big)$ – ступінь належності значення критерію вартість до бажаного рівня, $f_1(x)$ – обчислене значення вартості, c_1 – бажана максимальна вартість, c_2 – граничне допустиме значення вартості.

Аналогічно можна записати і для інших критеріїв. Наприклад для критерію $f_4(x)$ – «безпека»:

Тобто

$$\mu_4\big(f_4(x)\big) = \begin{cases} 1, & f_4(x) \le s_1, \\ \frac{f_4(x) - s_1}{s_2 - s_1}, & s_1 < f_4(x) < s_2, \\ 0, & f_4(x) \ge s_2, \end{cases} \quad (3)$$

де s_1 – мінімальний допустимий рівень безпеки,

s_2 – бажаний рівень безпеки (наприклад, 0,9).

Зазначимо, що в межах статті ми навели лише два приклади, тобто вирази (2) та (3), відповідно, критерій вартості $f_1(x)$, який мінімізується, та критерій безпеки $f_4(x)$, який максимізується. Такий вибір зумовлений тим, що всі інші критерії мають аналогічну функціональну природу й не потребують дублювання схожих математичних виразів.

З математичного погляду всі критерії, що максимізуються ($f_2(x) - f_7(x)$, окрім $f_1(x)$), мають однакову трикутну або трапецієподібну функцію належності, яка монотонно зростає в інтервалі від нижньої межі (незадовільне значення) до бажаного рівня, після чого ступінь належності приймає максимальне значення 1. Тобто для кожного такого критерію j ($j \in \{2, 3, 4, 5, 6, 7\}$) можна задати функцію належності у вигляді [11]:

$$\mu_j\left(f_j(x)\right) = \begin{cases} 1, & f_j(x) \le a_j, \\ \frac{f_j(x) - a_j}{b_j - a_j}, & a_j < f_j(x) < b_j, \\ 0, & f_j(x) \ge b_j, \end{cases} \quad (4)$$

де a_j – нижній допустимий рівень критерію;

b_j – бажаний рівень задоволення критерію.

Такий загальний вигляд є універсальним для всіх критеріїв, які підлягають максимізації, тобто ($f_2(x) - f_7(x)$. Розгорнутий запис наведено тільки для критерію $f_4(x)$), («безпека»), див. вираз (3) як типового представника цієї групи, щоб не перевантажувати текст статті однаковими за структурою формулами.

Слід зазначити, що одним із ключових елементів математичної моделі вибору ХСП на основі нечіткої логіки є побудова агрегованої оцінки якості кожної потенційної конфігурації. Така оцінка дозволить нам перейти від багатокритеріальної нечіткої постановки задачі до єдиної узагальненої метрики, яка може бути використана в алгоритмах оптимізації. Тобто в межах моделі для кожного критерію може бути побудована відповідна функція належності $\mu_j\left(f_j(x)\right)$, яка відображає ступінь відповідності значення критерію $f_j(x)$ бажаному рівню. Проте для прийняття рішення недостатньо розглядати ці функції ізольовано. Потрібно буде об'єднати їх у єдину інтегральну оцінку, яка відображає узагальнену «якість» конфігурації ХСП із урахуванням усіх критеріїв (як ми прийняли раніше) одночасно.

І саме для цієї мети вводиться вираз (5). Тоді загальна функція оцінки матиме наступний вигляд:

$$\mu(x) = \bigwedge_{j=1}^{k} \mu_j\left(f_j(x)\right), \tag{5}$$

де $\bigvee -$ означає мінімальне значення серед всіх критеріїв (логіка Мамдані). Або можна використовувати агреговану оцінку через середнє:

$$\mu(x) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \mu_j\left(f_j(x)\right), \tag{6}$$

де k – кількість критеріїв оптимізації ХСП.

Зазначимо, що в процесі побудови узагальненої оцінки якості конфігурації хмарних сервісів ми використовуємо підхід, заснований на логіці Мамдані. Зокрема, операцію мінімуму над функціями належності критеріїв (вираз (5)). По-перше, логіка Мамдані базується на консервативному підході до прийняття рішень. Вона передбачає, що загальна ступінь прийнятності альтернативи визначається найменшим значенням серед усіх критеріїв. Такий підхід добре відповідає специфіці задачі вибору хмарних сервісів для великого підприємства, де навіть одне слабке місце (наприклад, низький рівень безпеки або продуктивності) може зробити всю конфігурацію непридатною для використання. Наприклад, обрана конфігурація може бути економічно вигідною та добре масштабованою, але якщо вона не відповідає стандартам інформаційної безпеки, вона не може бути впроваджена в умовах жорстких нормативних вимог.

По-друге, на відміну від алгоритму Цукамото [11], який потребує побудови монотонних функцій належності й розрахунку зважених середніх для кожного правила, логіка Мамдані забезпечує простіший і більш інтерпретований механізм агрегації нечітких оцінок. У нашій задачі, де вже здійснено нормалізацію значень критеріїв до шкали [0,1] за допомогою відповідних функцій належності, використання операції мінімуму дозволяє нам безпосередньо визначити рівень задоволеності конфігурацією без додаткового моделювання.

По-третє, модель Мамдані [12] краще підходить для ситуацій, де мета – обрати найнадійніше рішення серед множини альтернатив. А це є типовим для багатокритеріальних задач із високою невизначеністю та нечіткістю вхідних даних. Алгоритм Цукамото більше підходить для задач, де вихідна змінна повинна бути числовою величиною з чітким значенням (наприклад, для керування у фізичних системах), а не для вибору або ранжування дискретних альтернатив, як у нашому випадку.

Тобто логіка Мамдані надає нам просту, прозору і формально обґрунтовану формулу агрегування критеріїв. А також забезпечує гнучкість для подальшої адаптації моделі в еволюційних алгоритмах.

Зазначимо, що задача вибору оптимального набору ХСП, як ми вже відмічали у першому розділі роботи, є класичною багатокритеріальною задачею з конфліктними критеріями та складною, потенційно нелінійною та неявно заданою цільовою областю. Критерії оцінювання мають різну природу (вартість, продуктивність, масштабованість, безпека тощо). А це, відповідно, унеможливлює однозначну агрегацію в єдину функцію.

Тому виникає потреба шукати Парето-оптимальний розв'язок – множину альтернатив, які не є домінованими одна одною.

Як було зазначено, у таких умовах еволюційні багатокритеріальні алгоритми (EMO – Evolutionary Multiobjective Optimization) мають низку переваг. Вони працюють з популяцією рішень, що дозволяє одразу генерувати апроксимацію Парето-фронту. Також EMO не потребують аналітичного представлення функцій. А лише потрібна здатність обчислити їх значення. А це, свою чергу, добре узгоджується з нечіткими функціями належності. Також EMO забезпечують широкий спектр рішень в одному запуску (exploration) та гнучко адаптуються до складної структури множини допустимих рішень (наприклад, дискретних комбінацій хмарних сервісів). Відповідно до цієї логіки, вважаємо, що для нашої задачі доцільно використати два сучасні еволюційні алгоритми.

Алгоритм NSGA-III є подальшим розвитком NSGA-II, адаптованим до задач з великою кількістю критеріїв (більше ніж три). Його ефективність базується на наступних положеннях [13]:

нелінійне сортування. Тобто популяція ділиться на фронти Парето-оптимальності. Рішення, які не домінуються жодним іншим, потрапляють до першого фронту PF_1, потім визначаються наступні рівні;

reference points. Відповідно, використовуються заздалегідь задані точки у просторі критеріїв для підтримання різноманіття та рівномірного покриття фронту;

формальне правило селекції. Тобто відбір особин відбувається з урахуванням не лише домінування, але й відстані до reference points, що зменшує ризик надмірної кластеризації рішень у певних ділянках фронту.

Математично, алгоритм забезпечує пошук множини рішень

$$PF = \{x \in X | \nexists\, x' \in X : x' \succ x\}, \tag{7}$$

де відношення Парето-домінування визначається як:

$$x' \succ x \;\Leftrightarrow\; \forall j, f_j(x), \exists j : f_j(x') > f_j(x). \tag{8}$$

Завдяки вбудованій нормалізації та reference vectors NSGA-III дозволить нам ефективно працювати навіть при високій розмірності простору критеріїв (у нашій задачі – сім критеріїв).

Як альтернативний метод також можна розглянути алгоритм MOEA/D.

На відміну від NSGA-III алгоритм MOEA/D ґрунтується на іншій концепції – декомпозиції багатокритеріальної задачі [14]. Він полягає в наступному:

Замість оперування з усім вектором критеріїв MOEA/D розбиває задачу на *N* скалярних підзадач. Далі кожної підзадачі оптимізується функція вигляду:

$$g^{(i)}(x) = \max_j \left[\lambda_j^{(i)} \cdot \left| f_j(x) - z_j^* \right|\right], \tag{9}$$

де $\lambda_j^{(i)}$ −ваговий коефіцієнт *j*-го критерію у *i*-й задачі;

z_j^* − еталонне (найкраще знайдене) значення за критерієм *j*.

Оптимізація кожної скалярної функції ведеться незалежно з частковим обміном інформацією між сусідніми підзадачами.

Це дозволяє краще фокусуватись на окремих ділянках Парето-фронту та зменшити обчислювальні витрати. Як зазначалося у [13], MOEA/D ефективний при великих просторах рішень і складних ландшафтах цільової функції, де пряме сортування (як у NSGA-III) стає обчислювально складним.

Відповідно, кожен алгоритм (тобто NSGA-III та MOEA/D [13-17]) працює з множиною кандидатів x_i, обчислює $\mu_j\left(f_j(x)\right)$ і формує Парето-фронт:

$$PF = \{x \in X \mid \nexists\, x' : \forall j, f_j(x') > f_j(x), \exists j : f_j(x') > f_j(x)\}. \quad (10)$$

Вираз (10) – це множина конфігурацій хмарних сервісів, для яких не існує альтернативи, що була б кращою одночасно за всіма критеріями для підприємства. Кожен елемент $x \in PF$ представляє потенційно оптимальне рішення для підприємства залежно від його пріоритетів та умов.

Розглянуті еволюційні багатокритеріальні алгоритми – NSGA-III та MOEA/D – забезпечують в нашому дослідженні ефективне знаходження множини Парето-оптимальних рішень для задачі вибору ХСП. Однак для цілісної оцінки якості та обґрунтованості обраних оптимізаційних рішень ХСП доцільно також застосувати класичні підходи до багатокритеріального аналізу. Зокрема, можна використати метод ієрархій [18] (AHP – Analytic Hierarchy Process). AHP тоді виступає як базовий рівень порівняння, а також є додатковим засобом для валідації та пояснення отриманих результатів. Також AHP дозволяє формалізувати суб'єктивні експертні оцінки у вигляді попарних порівнянь критеріїв, що є суттєвим на початкових етапах прийняття рішень по розгортанню хмарних сервісів на підприємстві.

Тому далі розглянемо застосування методу AHP для побудови базової ієрархічної моделі оцінювання та порівняння альтернатив, що дозволить сформувати нам початкові пріоритети та надалі використати їх як відправну точку або орієнтир для еволюційних методів.

Тобто для порівняння з еволюційними підходами в нашому досліджені застосовується метод Fuzzy AHP. Наведемо етапи роботи цього методу:

- формуються попарні порівняння критеріїв у вигляді нечітких чисел;
- будується матриця парних порівнянь $\tilde{A}$, з якої виводиться вектор ваг $\tilde{w}$;
- виконується остаточна оцінка конфігурації згідно виразу (11):

$$F_{AHP}(x) = \sum_{j=1}^{k} \tilde{w}_j \cdot \mu_j\left(f_j(x)\right), \quad (11)$$

де $\tilde{w}_j$ – нечітка вага критерію *j*;

$\mu_j\left(f_j(x)\right)$ – нечітка оцінка за критерієм *j*.

Таким чином, у рамках поточного дослідження було запропоновано модель, яка дозволяє відображати уподобання підприємств при виборі хмарних сервісів через нечіткі функції належності. Формалізовано 7 основних критеріїв, що відображають реальні потреби бізнесу. А інтеграція нечіткої логіки з NSGA-III та MOEA/D дозволяє отримати множину Парето-оптимальних рішень та провести аналіз компромісів між альтернативами.

Метод Fuzzy AHP використовується для порівняння точнісних та евристичних стратегій прийняття рішень.

Отримана в результаті застосування еволюційних багатокритеріальних алгоритмів (NSGA-III та MOEA/D) множина Парето-оптимальних рішень [19] являє собою набір конфігурацій хмарних сервісів, кожна з яких не домінує над іншою за всіма критеріями одночасно. Така множина дозволяє нам відобразити компромісний характер задачі, в якій не існує єдиного найкращого рішення, а лише спектр альтернатив, кожна з яких є оптимальною у певному сенсі – наприклад, має нижчу вартість, але гіршу інтеграцію ХСП або безпеку тощо.

Однак множина Парето сама по собі не дає остаточної відповіді на питання, яке саме рішення ХСП має бути впроваджене на практиці. З прикладного погляду особа, що ухвалює рішення (далі – ОПР), повинна зробити свідомий вибір, який враховує стратегічні, технічні або економічні пріоритети конкретного підприємства. Це релевантно, наприклад, в умовах, коли підприємство має обмежені ресурси, власні нормативні вимоги (як у банківській сфері) або внутрішні політики, що впливають на допустимість чи бажаність певних рішень.

З цією метою доцільно ввести поняття множини опорних (еталонних) рішень – підмножини Парето-фронту, яка найкраще узгоджується з пріоритетами, очікуваннями або експертними оцінками ОПР. Такі опорні рішення можуть бути побудовані шляхом формалізації переваг ОПР у вигляді бажаних значень критеріїв (еталонного профілю) або за допомогою функції бажаності чи функції корисності.

Розглянемо математичний підхід до побудови таких опорних рішень, а також формалізуємо процедуру оцінювання ступеня наближеності Парето-альтернатив [19] до уподобань ОПР. Це дозволить нам здійснити подальше ранжування або остаточний вибір альтернативи, яка найкраще задовольняє вимоги конкретного підприємства.

Позначимо:

N – кількість альтернатив (кандидатних конфігурацій хмарних сервісів);

$k = 7$ – кількість критеріїв;

$x_i \in X,$ де $i = 1, \dots, N -$ конфігурація ХСП;

$\mu_j\left(f_j(x_i)\right) \in [0,1] -$ ступінь задоволення за критерієм j для альтернативи x_i;

$\widetilde{w}_j \in [0,1], \sum_{j=1}^{k} \widetilde{w}_j = 1 -$ ваги пріоритетів ОПР.

Тоді опорне рішення визначається як розв'язок, який максимізує агреговану функцію бажаності:

$$x^{ref} = arg \max_{x_i \in PF} \left(U(x_i) = \sum_{j=1}^{k} \widetilde{w}_j \cdot \mu_j\left(f_j(x_i)\right) \right). \tag{12}$$

Ця функція бажаності відображає суб'єктивні пріоритети ОПР через ваги $\widetilde{w}_j$. А ступені належності критеріїв забезпечують нормалізацію та уніфікацію шкал.

Також можливий альтернативний підхід. ОПР визначає вектор бажаних рівнів задоволеності критеріїв

$$g = (g_1, g_2, \dots, g_k) \in [0,1]^k,$$

після чого для кожної альтернативи обчислюється відстань до бажаного профілю:

$$D(x_i, g) = \left(\sum_{j=1}^{k} \left(\mu_j\left(f_j(x_i)\right) - g_i \right)^2 \right)^{1/2}, \tag{13}$$

$$x^{ref} = arg \max_{x_i \in PF} D(x_i, g).$$

Таким чином, вирази (12) та (13) дозволяють знайти рішення, найближче до індивідуального еталона, сформованого ОПР. Подібний підхід буде ефективний у випадках, коли пріоритети не можуть бути виражені у вигляді ваг, але відомі бажані рівні за критеріями. В обох випадках отримані опорні рішення можуть слугувати:

для вибору остаточної конфігурації ХСП;

для порівняння з результатами класичних методів (наприклад, Fuzzy AHP);

для візуалізації й подальшого узгодження із зацікавленими сторонами.

Використання відстані до вектора бажаних рівнів задоволеності критеріїв, як це представлено у виразі (13), є доцільним у тих випадках, коли особа, що приймає рішення, не може або не бажає задавати точні числові ваги для кожного критерію, але здатна вказати бажані рівні досягнення по кожному з них. Це часто трапляється у практичних умовах, коли експерти мислять у категоріях «достатньо високий рівень продуктивності», «прийнятна вартість», «максимально можлива безпека» тощо, а не у термінах конкретних значень ваг.

Наприклад, для великого підприємства ОПР можуть бути визначені такі цільові значення ступенів задоволеності критеріїв:

- бажано, щоб вартість сервісу була низькою $g_1 = 0{,}9$;
- масштабованість – високою $g_2 = 0{,}8$;
- продуктивність – не нижче середнього рівня $g_3 = 0{,}6$;
- безпека – не менше ніж 0.85 $g_4 = 0{,}85$;
- надійність – близька до 1 $g_5 = 0{,}95$;
- відповідність стандартам – не менше 0.7 $g_6 = 0{,}7$;
- інтеграція з іншими сервісами – бажано $g_7 = 0{,}9$.

У таких випадках підприємство (а саме ОПР) не проводить формального розподілу ваг, але чітко формулює, яких характеристик ХС воно прагне. Модель, яка використовує евклідову відстань до цього вектора бажаностей (13), дозволяє автоматично знайти рішення з Парето-множини, яке найбільше наближене до таких очікувань. Це підвищує інтерпретованість моделі та дозволяє залучати осіб без математичної підготовки до процесу вибору.

З методологічного погляду, такий підхід відрізняється від класичних методів АНР або нечіткої вагової агрегації тим, що:

- не вимагає узгодженості між критеріями (що часто порушується в реальних умовах);
- дозволяє оцінювати відповідність рішень на геометричному рівні (відстань у просторі задоволеності критеріїв);
- забезпечує можливість багатоваріантного вибору на основі змінного профілю переваг (що зручно для порівняння сценаріїв або прийняття рішень у динамічному середовищі).

Отже, побудова множини опорних рішень доповнює Парето-аналіз і забезпечує інтерпретованість та практичну реалізацію оптимізаційної моделі.

Результати дослідження. Алгоритм NSGA-III (рис. 1) продемонстрував стабільну збіжність протягом 100 поколінь, про що свідчить динаміка зміни кількості недомінованих рішень, яка коливалася від 11 до 79, та показника eps, що знизився з 0,029 у другому поколінні до 0,007 у останньому.

Ця тенденція підтверджує ефективність процесу оптимізації та його стабілізацію у ході виконання. Отриманий Парето-фронт (рис. 1) містить 23 оптимальні конфігурації хмарних сервісів, які демонструють значний розкид значень за ключовими критеріями. Вартість послуг коливається від 1092,03 до 1594,96 USD з коефіцієнтом варіації 10,65 %, що свідчить про наявність як економічних, так і дорожчих варіантів ХСП. Показники масштабованості залишаються високими (14,17-14,99) з відносно невеликим розкидом (CV 1,15 %), тоді як рівень безпеки демонструє ще більшу стабільність (0,9747-0,9993, CV 0,68 %). Найбільшу варіативність виявлено у показнику відповідності стандартам (0,5265-0,9999, CV 10,09 %), що може бути пов’язано з різними підходами до сертифікації.

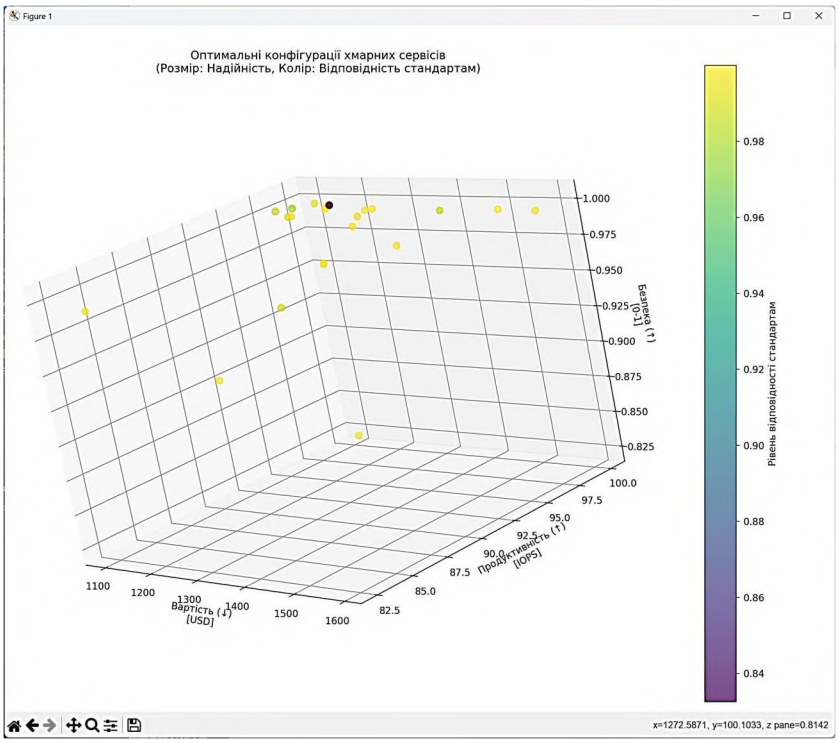


Рис. 1. Результати дослідження: оптимальність хмарних сервісів
Джерело: розроблено автором.

Аналіз кореляційних залежностей виявив класичні компромісні відносини між ключовими параметрами. Найбільш вираженою є негативна кореляція між вартістю та продуктивністю (r = -0,82), що підтверджує теорію про неможливість одночасного досягнення мінімальної вартості та максимальної продуктивності ХСП. Позитивна кореляція між безпекою та відповідністю стандартам (r = 0,76) вказує на взаємозв'язок цих характеристик, тоді як нелінійна залежність між масштабованістю та інтеграцією потребує подальшого дослідження. Отримані результати підтверджують гіпотезу про неможливість одночасного досягнення екстремальних значень усіх цільових функцій та наявність чітких компромісів між ними. Ці висновки узгоджуються з результатами останніх досліджень у галузі багатокритеріальної оптимізації IT-сервісів, зокрема з роботами [13] та [14].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Дослідження довело ефективність комбінованого підходу, що поєднує нечітку логіку з еволюційними алгоритмами для вибору хмарних сервісів підприємств (ХСП). Застосування NSGA-III та MOEA/D забезпечило знаходження широкого спектру Парето-оптимальних рішень з урахуванням конфліктних критеріїв. Ключовою перевагою запропонованої моделі є можливість врахування нечіткості експертних оцінок через функції належності $\mu_j\left(f_j(x)\right)$ та їх агрегацію за логікою Мамдані. Результати підтверджують наявність класичних компромісів, зокрема, між вартістю та продуктивністю, що узгоджується з теоретичними передбаченнями. Інтеграція з Fuzzy AHP дозволила підвищити інтерпретованість результатів для практичного застосування.

Перспективи подальших досліджень включають розв'язання уточнення функцій належності для окремих критеріїв, впровадження механізмів динамічної адаптації вагових коефіцієнтів у відповідь на зміну пріоритетів, а також інтеграцію запропонованого підходу з методами групового прийняття рішень для забезпечення більш комплексного аналізу ХСП.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Під час написання цього матеріалу автор використовував ChatGPT для перекладу анотації та використаних джерел на англійську мову. Після використання цього інструменту автор переглянув та відредагував зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Камінський, О. Є. (2018). Багатокритеріальна оптимізація вибору провайдерів хмарних сервісів. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Серія: Економічні науки*, (1), 88-94.

2. Фокін, К. М., & Нехай, В. В. (2020). *Процес вибору хмарних IT-сервісів. секція 1 сучасні аспекти математичного та імітаційного моделювання систем в екології та геології*, 186.

3. Chang, R. S., Liao, C. S., & Liu, C. Y. (2013). Choosing Clouds for an Enterprise: Modeling and Evaluation. *International Journal of E-Entrepreneurship and Innovation (IJEEI),* 4(2), 38-53.

4. Yan, S., Chen, C., Zhao, G., & Lee, B. S. (2012, October). Cloud service recommendation and selection for enterprises *Workshop on Systems Virtualization Management (SVM) (pp. 430-434). IEEE.*

5. Sun, L., Dong, H., Hussain, F. K., Hussain, O. K., & Chang, E. (2014). Cloud service selection: State-of-the-art and future research directions. *Journal of Network and Computer Applications*, 45, 134-150.

6. Hsu, C. L., & Lin, J. C. C. (2016). Factors affecting the adoption of cloud services in enterprises. *Information Systems and e-Business Management*, 14, 791-822.

7. Padhy, R. P., & Patra, M. R. (2012). An enterprise cloud model for optimizing IT infrastructure. *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, 1(3), 123.

9. Mateos, A., & Rosenberg, J. (2010). *The Cloud at Your Service: The when, how, and why of enterprise cloud computing*. Simon and Schuster.

10. Faiz, M., & Daniel, A. K. (2024). A multi-criteria cloud selection model based on fuzzy logic technique for QoS. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *15*(2), 687-704.

11. Esposito, C., Ficco, M., Palmieri, F., & Castiglione, A. (2015). Smart cloud storage service selection based on fuzzy logic, theory of evidence and game theory. *IEEE Transactions on computers*, 65(8), 2348-2362.

12. Basu, A., & Ghosh, S. (2018). Implementing fuzzy TOPSIS in cloud type and service provider selection. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018(1), 2503895.

13. Miriam, A. J., Saminathan, R., & Chakaravarthi, S. (2021). Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-III) for effective resource allocation in cloud. *Evolutionary Intelligence*, *14*, 759-765.

14. Imene, L., Sihem, S., Okba, K., & Mohamed, B. (2022). A third generation genetic algorithm NSGAIII for task scheduling in cloud computing. *Journal of King Saud university-computer and information sciences*, *34*(9), 7515-7529.

15. Gopu, A., & Venkataraman, N. (2019). Optimal VM placement in distributed cloud environment using MOEA/D. *Soft Computing*, 23(21), 11277-11296.

16. Kumar, S., Bahsoon, R., Chen, T., Li, K., & Buyya, R. (2018, December). Multi-tenant cloud service composition using evolutionary optimization. *International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)* (pp. 972-979). IEEE.

17. Zhou, J., Gao, L., Yao, X., Zhang, C., Chan, F. T., & Lin, Y. (2020). Evolutionary many-objective assembly of cloud services via angle and adversarial direction driven search. *Information Sciences*, *513*, 143-167.

18. Lee, Y. H. (2014). A decision framework for cloud service selection for SMEs: AHP analysis. *SOP Transactions on Marketing Research*, *1*(1), 51-61.

19. Лахно, В., Криворучко, О., & Каламан, Є. (2025). Програмна реалізація вирішення задачі оптимізації вибору засобів захисту інформації на основі еволюційного алгоритму. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка», 3*(27)*,* 257-268.

References

1. Kaminskyi, O. Ye. (2018). Bahatokryterialna optymizatsiia vyboru provaideriv khmarnykh servisiv [Multi-criteria optimization of cloud service provider selection]. *Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal Internauka. Seriia: Ekonomichni nauky – International scientific journal 'Internauka'. Series: Economic Sciences,* (1), 88-94.

2. Fokin, K. M., & Nekhai, V. V. (2020). Protses vyboru khmarnykh IT-servisiv [Process of cloud IT service selection]. *Sektsiia 1 Suchasni aspekty matematychnoho ta imitatsiinoho modeliuvannia system v ekolohii ta heolohii – Section 1 Modern aspects of mathematical and simulation modelling of systems in ecology and geology,* 186.

3. Chang, R. S., Liao, C. S., & Liu, C. Y. (2013). Choosing Clouds for an Enterprise: Modeling and Evaluation. *International Journal of E-Entrepreneurship and Innovation (IJEEI), 4*(2), 38-53.

4. Yan, S., Chen, C., Zhao, G., & Lee, B. S. (2012, October). Cloud service recommendation and selection for enterprises *Workshop on Systems Virtualization Management (SVM) (pp. 430-434). IEEE.*

5. Sun, L., Dong, H., Hussain, F. K., Hussain, O. K., & Chang, E. (2014). Cloud service selection: State-of-the-art and future research directions. *Journal of Network and Computer Applications, 45,* 134-150.

6. Hsu, C. L., & Lin, J. C. C. (2016). Factors affecting the adoption of cloud services in enterprises. *Information Systems and e-Business Management*, *14*, 791-822.

7. Padhy, R. P., & Patra, M. R. (2012). An enterprise cloud model for optimizing IT infrastructure. *International Journal of Cloud Computing and Services Science*, *1*(3), 123.

9. Mateos, A., & Rosenberg, J. (2010). *The Cloud at Your Service: The when, how, and why of enterprise cloud computing*. Simon and Schuster.

10. Faiz, M., & Daniel, A. K. (2024). A multi-criteria cloud selection model based on fuzzy logic technique for QoS. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *15*(2), 687-704.

11. Esposito, C., Ficco, M., Palmieri, F., & Castiglione, A. (2015). Smart cloud storage service selection based on fuzzy logic, theory of evidence and game theory. *IEEE Transactions on computers*, *65*(8), 2348-2362.

12. Basu, A., & Ghosh, S. (2018). Implementing fuzzy TOPSIS in cloud type and service provider selection. *Advances in Fuzzy Systems*, 2018(1), 2503895.

13. Miriam, A. J., Saminathan, R., & Chakaravarthi, S. (2021). Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-III) for effective resource allocation in cloud. *Evolutionary Intelligence*, *14*, 759-765.

14. Imene, L., Sihem, S., Okba, K., & Mohamed, B. (2022). A third generation genetic algorithm NSGAIII for task scheduling in cloud computing. *Journal of King Saud university-computer and information sciences*, *34*(9), 7515-7529.

15. Gopu, A., & Venkataraman, N. (2019). Optimal VM placement in distributed cloud environment using MOEA/D. *Soft Computing*, *23*(21), 11277-11296.

16. Kumar, S., Bahsoon, R., Chen, T., Li, K., & Buyya, R. (2018, December). Multi-tenant cloud service composition using evolutionary optimization. *International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)* (pp. 972-979). IEEE.

17. Zhou, J., Gao, L., Yao, X., Zhang, C., Chan, F. T., & Lin, Y. (2020). Evolutionary many-objective assembly of cloud services via angle and adversarial direction driven search. *Information Sciences*, *513*, 143-167.

18. Lee, Y. H. (2014). A decision framework for cloud service selection for SMEs: AHP analysis. *SOP Transactions on Marketing Research*, *1*(1), 51-61.

19. Lakhno, V., Kryvoruchko, O., & Kalaman, Ye. (2025). Prohramna realizatsiia vyrishennia zadachi optymizatsii vyboru zasobiv zakhystu informatsii na osnovi evoliutsiinoho alhorytmu [Software implementation of solving the optimization problem of selecting information security tools based on an evolutionary algorithm]. *Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika» – Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: Education, Science, Technology"*, *3*(27), 257-268.

Отримано 16.09.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.415.5:004.8

Mykhailo Khomchak

PhD Student
State University "Kyiv Aviation Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: mykhailo.khomchak@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-4127-556X
ResearcherID: OMM-1519-2025

MODEL OF CLOUD SERVICE SELECTION BASED ON FUZZY LOGIC AND MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION

In the current context, especially for large enterprises in Ukraine operating under external aggression from Russia, the choice of optimal cloud service platforms (CSPs) becomes critically important for ensuring the stability, security, and efficiency of business processes. The article presents a mathematical model for enterprise CSP selection based on the integration of fuzzy logic and evolutionary methods of multi-criteria optimization. The problem is formalized as the search for Pareto-optimal solutions in a space of seven criteria: cost (minimization), scalability, performance, security, reliability, compliance with standards, and integration (maximization). The criteria are described by membership functions $\mu_j\left(f_j(x)\right)$*, which allow the uncertainty of expert evaluations to be taken into account. For criteria aggregation, Mamdani logic is applied, where the overall evaluation μ(x) is defined as the minimum of membership degrees, providing a conservative approach to decision-making. Optimization is implemented using NSGA-III and MOEA/D algorithms, adapted for high-dimensional criteria spaces. NSGA-III applies reference points to maintain solution diversity, while MOEA/D is based on decomposing the problem into scalar subproblems. The computational results demonstrate stable algorithm convergence, confirmed by the dynamics of the eps indicator and the number of non-dominated solutions. The Pareto front contains 23 configurations with a cost variation coefficient of 10,65 % and high stability of security criteria (CV 0,68 %). A negative correlation between cost and performance (r = −0,82) and a positive correlation between security and compliance (r = 0,76) were identified. For further solution ranking, the Fuzzy AHP method is proposed, which formalizes decision-makers' subjective preferences through fuzzy weights* $\widetilde{w}_j$*. The model enables trade-offs between criteria and adapts to the dynamic requirements of enterprises.*

Keywords: *cloud technologies; cloud computing; public cloud; cloud service provider selection; analytic hierarchy process.*
Fig.: 1. References: 19.

Хомчак М. В. Модель вибору хмарних сервісів на основі нечіткої логіки та багатокритеріальної оптимізації. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 272-283. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-272-283.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-284-295
УДК 004.75

Вячеслав Іванович Чимшир

аспірант кафедри інформаційних систем та технологій
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: vchimshir@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-2555-5373

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ДВИГУН І МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ПЛАТФОРМИ КОМПЛЕКСНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСІВ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ІНФОКОМУНІКАЦІЙНИХ СЕРВІСІВ

Розглянута проблема розроблення інтелектуального двигуна як основи інтеграції засобів автоматизації процесів життєвого циклу сервісів моделей і методів для розроблення інструментів ініціації та бізнес-аналізу для платформи підтримки життєвого циклу сервісів у інформаційних системах провайдерів. Запропонований загальний підхід до підтримки процесів усіх етапів життєвого циклу сервісів. Інтелектуальний двигун виступає в ролі асистента команди підтримки життєвого циклу сервісів. Інтелектуальний двигун реалізований на основі відповідно структурованої і навченої великої мовної моделі. Для комунікації з користувачами в контексті проблем велика мовна модель інтегрується із зовнішніми базами знань за допомогою системи генерації з доповненим пошуком знань. Структурована відповідно до поставленої проблеми інформація допомагає великій мовній моделі формувати правильну і зрозумілу користувачам відповідь у контексті проблеми. Для етапів ініціації та бізнес-аналізу, виявлення вимог та побудови архітектури сервісів запропоновані відповідні моделі та методи, реалізовані в рамках загального підходу, порядок і особливості застосування яких підказує асистент.

Для реалізації прототипу рішення використані сучасні технології. Для наповнення бази знань застосовані структура DataFrame і бібліотека Pandas. Векторизація представлень і семантичний пошук релевантного контексту виконані за допомогою моделі all-MiniLM-L6-v2. Формування підказки з контекстом для великої мовної моделі, генерація відповіді реалізовані засобами відкритої моделі Llama 2 у вигляді Docker-сервісу.

Виконане експериментальне дослідження прототипу з порівнянням моделей all-MiniLM-L6-v2, paraphrase-MiniLM-L3-v2 і all-mpnet-base-v2 за такими прийнятими метриками як час генерації векторних представлень, час перетворення одного запиту користувача на вектор, час обчислення схожості між запитом та всіма векторами бази, косинусна і середня подібність підтвердило працездатність запропонованого рішення. Зріс відсоток релевантних відповідей на запити користувачів. Реалізований варіант досить ефективний у проектах з невеликою або середньою кількістю записів. Його використання у проєктах з великими базами вимагатиме для швидкого пошуку розбиття бази на тематичні блоки.

Ключові слова: *сервісний підхід; інфокомунікаційні сервіси; життєвий цикл сервісів; штучний інтелект; Large Language Model (LLM).*

Табл.: 1. Бібл.: 31.

Актуальність теми дослідження. Сервісний підхід широко впроваджується у всіх галузях діяльності людини, зокрема в галузі інфокомунікацій. Інформаційні системи (ІС) провайдерів надаються ІТ-компаніями за моделлю End-to-End (E2E) і орієнтовані на підтримку системи бізнес-процесів. Досягненню бізнес-цілей провайдерів сприяють нові методи роботи. У таких умовах інструменти підтримки діяльності провайдерів надаються за моделлю платформи підтримки життєвого циклу (ЖЦ), що дозволяє розробляти, впроваджувати і розвивати ІС-провайдерів інфокомунікаційних послуг (ІКП) [1].

Виникає потреба в ефективних моделях та методах підтримки окремих процесів ЖЦ сервісів та інтелектуальному асистенті для служб ІТ-компанії і провайдерів ІКП, здатному допомагати їм підтримувати, контролювати й поліпшувати діяльність провайдера.

Для цього доцільно використовувати велику мовну модель – Large Language Model (LLM), яка підтримуватиме ЖЦ сервісів, орієнтуючи його на досягнення цілей провайдерів шляхом використання моделей та методів підтримки окремих процесів, наприклад, запропонованих у праці [2]. Це перетворить зазначену платформу в ефективний інструмент вирішення проблем діяльності провайдера, але породжує важливу наукову проблему.

Стаття присвячена актуальній темі – розробленню інтелектуального двигуна, здатного перетворити комплекс відповідних моделей та методів процесів ЖЦ сервісів у інструмент вирішення проблем діяльності провайдера. Для цього генеративні можливості LLM треба доповнити здатністю міркувати, приймати рішення, вирішувати проблеми.

© В. І. Чимшир, 2025

Постановка проблеми. Необхідно LLM і відповідні моделі та методи спрямувати на підкріплення можливостей працівників ІТ-компаній і провайдера. Інтелектуальний двигун, комунікуючи з користувачами, повинен розуміти проблеми й допомагати їх вирішувати, залучаючи відповідні інструменти (LLM, нейронні мережі, програмні компоненти). LLM структурується в рамках платформи підтримки ЖЦ сервісів, дозволяючи поєднувати її традиційні можливості з підходами до вирішення проблем шляхом їх декомпозиції.

При розв'язанні проблеми необхідно врахувати специфіку галузі інфокомунікацій.

По-перше, необхідно розробити моделі, методи та інструменти підтримки множини взаємопов'язаних процесів, згрупованих в етапи ЖЦ сервісів та їх інтеграції з врахуванням бізнесового та операційного рівнів, виділенням бізнес-процесів, додатків і технологій [3].

По-друге, оскільки ресурси зосереджені в ІТ-інфраструктурі, надання сервісів визначеного рівня вимагає моделей та методів оптимального використання її ресурсів.

По-третє, при використанні моделі E2E ІТ-компанії повинні постійно удосконалювати підтримувані ними ІС-провайдерів, щоб надавати найбільш дешевим способом вчасно якісні послуги і запобігти втратам у всьому ланцюжку – клієнт-провайдер-ІТ-компанія.

По-четверте, орієнтований на потреби користувачів розвиток, зростання конкуренції і вимог замовників вимагають забезпечення певного рівня рентабельності діяльності.

Нові умови породжують нові проблеми. Універсальним рішенням є платформа підтримки ЖЦ сервісів. Але набір її інструментів треба впорядкувати і створити відкрите середовище, комфортне для тих, хто відповідає за надання сервісів користувачам.

Вихід полягає у створенні інтелектуального двигуна – асистента працівників ІТ-компанії і провайдерів ІКП, який зрозуміє користувача і його проблему та допоможе її вирішити, використовуючи інструменти платформи підтримки ЖЦ сервісів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню інтелектуальних інструментів підтримки процесів ЖЦ сервісів приділяється все більше уваги. Предметом дослідження найчастіше є використання LLM у різних галузях для природомовної комунікації [4]. Однак у багатьох джерелах, наприклад [5], LLM вже використовують як засіб комунікації з користувачем, який розуміє проблеми й допомагає їх вирішити.

З метою надати LLM здатність виконувати багатоетапне міркування, планувати дії та звертатися до зовнішніх джерел даних запропоновано ряд реалізацій агентного підходу, наприклад, Chain-of-Thought, ReAct, Graph-of-Thought, AutoGPT, BabyAGI, Plan-and-Solve Prompting, Toolformer, Reflexion. Агентним рішенням притаманні багатокроковість, явне насамперед ітеративне планування наступних дій, взаємодія з різними інструментами [6].

Набуває популярності генерація з доповненим пошуком знань – Retrieval-Augmented Generation (RAG), орієнтована на один цикл отримання контексту з наступною генерацією відповіді на запит користувача [7]. Результати семантичного пошуку потрібних рядків у базі знань допомагають LLM формувати відповідь. Зовнішні знання залучаються у вигляді наперед індексованого CSV-вмісту. LLM з RAG надає правильніші відповіді на питання.

Розробленню математичних моделей та методів підтримки ЖЦ сервісів присвячені багато праць, які охоплюють як окремі процеси ЖЦ сервісів, наприклад [8], так і методологію бізнесової діяльності з погляду концепції сервісів, наприклад [9; 10]. Популярним предметом досліджень також є моделі та методи визначення параметрів рівня обслуговування, забезпечення визначеного рівня показників надання сервісів, безпеки й довіри, управління змінами [11], підтримки найважливіших етапів ЖЦ сервісів, насамперед проєктування, реалізації, надання [12], управління навантаженням і ресурсами, моніторингу та аналізу функціонування ІТ-інфраструктури з врахуванням параметрів сервісів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Не всі проблеми, пов'язані з впровадженням сервісного підходу, вирішено. Так, вимагає ефективного вирішення комплексна проблема підтримки процесів ЖЦ сервісів, а також проблема розроблення

ефективних інструментів – платформ, ІТ, компонентів для проєктування, реалізації і надання сервісів у галузі інфокомунікацій. При цьому перспективною видається інтеграція в рамках LLM інструментів підтримки процесів ЖЦ сервісів, побудованих на основі моделей ШІ, прийняття рішень, математичного програмування та ін.

Метою дослідження є встановлення ефективності RAG-підходу для інтеграції баз знань з можливостями LLM. Створене рішення при роботі з реальною базою знань повинне надавати точні відповіді на запити користувачів, мінімізуючи «галюцинації». Для досягнення цієї мети будуть перевірені такі гіпотези:

Гіпотеза 1. RAG-підхід забезпечить не менше 90 % правильних відповідей на питання користувачів, тоді як точність LLM без RAG-системи є набагато нижчою.

Гіпотеза 2. Семантичний пошук на основі векторних представлень забезпечить вищу релевантність відповідей у порівнянні з простим ключовим пошуком. У якості KPI тут будемо використовувати частку запитів, для яких знайдено правильний запис у базі знань.

Гіпотеза 3. Рішення на основі RAG забезпечить прийнятний час відповіді для інтерактивного використання (KPI – середній час відповіді на один запит має залишатися в інтервалі 1-5 с із врахуванням часу індексації даних, важливого для масштабування).

Сформульована мета направлена на досягнення загальної мети створення ІС-провайдерів ІКП – збільшення ефективності діяльності працівників ІТ-компаній і провайдерів ІКП, пов'язаної з підтримкою процесів ЖЦ сервісів.

Постає проблема створення інтелектуального асистента для підтримки процесів ЖЦ сервісів у ІС провайдерів інфокомунікацій з врахуванням наведеної вище специфіки галузі.

Виклад основного матеріалу.

Концепція пропонованого рішення. Структура інтелектуального двигуна наведена на рисунку. Оскільки задачі підтримки ЖЦ сервісів дуже різноманітні, для надання двигунові здатності до розв'язання проблем тут використано два популярних на сьогодні підходи – інтелектуальні агенти і RAG. Перші зручні для розв'язання традиційних комплексних проблем підтримки процесів окремих етапів. Дійсно, оркестратор виконує декомпозицію комплексної проблеми, а інтелектуальні агенти (сервіси) призначені для розв'язання окремих підпроблем. З іншого боку, змінність умов діяльності провайдерів та ІТ-компаній, поява нових регуляторних документів, методик, узагальнень досвіду вимагають розуміння проблем користувачів і пошуку релевантних відповідей на природномовні запити користувачів. Тут доцільним видається використання LLM з RAG-системою. Реалізації саме цього підходу присвячена стаття.

Стандартна LLM буде додатково структурована і навчена, щоб знати всі процеси, їх зв'язки, входи й виходи, комунікувати з користувачем природною мовою, розуміти його наміри та проблеми, генерувати релевантні відповіді на його запити. Структурування LLM доцільне з погляду ЖЦ сервісів, охоплюючи цілісну систему (LLM кореневого рівня), процеси етапів (LLM першого рівня) і т. ін.

В ІС-провайдерів ІКП LLM повинні надавати точні відповіді на велику множину специфічних запитів користувачів, які вирішують складні проблеми. Для генерування релевантних відповідей у контексті підтримки ЖЦ сервісів, сучасним LLM треба прищепити можливості спілкуватися в термінах проблем, підпроблем, причин, наслідків, передумов, варіантів рішення, вибору варіантів рішення і т. ін. Ці моделі мають бути навчені розуміти призначення кожних груп процесів, процесу і підпроцесу, їх входи, виходи, зв'язки, стан об'єктів контролю, управління, оцінювання, проблеми контролю, управління, оцінювання, засоби вирішення проблем.



Рис. 1. Структура інтелектуального двигуна (посилання!)
Джерело: розроблено автором.

Щоб LLM підтримувала діалог, виконувала роль асистента у реалізації відповідного процесу чи їх групи будемо використовувати RAG-системи. Для співпраці з користувачами в термінах вирішення проблем будемо інтегрувати LLM із зовнішніми базами знань. Перед генеруванням відповіді LLM отримує від RAG-системи адекватний фрагмент інформації відповідно до поставленої проблеми структурованої і заповненої бази знань [7]. LLM формує відповідь у контексті проблеми на фактичних даних про базові сценарії і шаблони операцій для надання сервісів. Це зменшує ймовірність «галюцинацій» моделі й користувачі інтерпретують відповіді в термінах проблеми.

При такому підході універсальне розв'язання проблем через поєднання міркувань, планування та виклик зовнішніх інструментів поступається простішим методам отримання контексту при роботі з CSV-даними за рахунок точного «витягання» потрібних фактів із заданого набору даних і генерації відповіді винятково на основі отриманої підказки. Безітераційність зменшує гнучкість рішення, не дозволяє поділити складне питання на підпитання, коригувати план, якщо прямої відповіді не знайдено. Водночас гарантується вища надійність, зменшуються ризики неправильних відповідей. У такий спосіб, інтегруючи генеративні можливості LLM з можливостями RAG, інтелектуальний двигун забезпечує підтримку процесів ЖЦ сервісів у взаємодії з працівниками IT-компанії і провайдера, приводячи в дію засоби платформи підтримки сервісів.

Реалізація перспективного інтелектуального двигуна. Підсумовуючи викладене вище, інтегральне рішення для комплексної підтримки процесів ЖЦ сервісів за рахунок створення інтелектуального двигуна доцільно будувати на концепціях прототипування, структурування, керованого швидкого пошуку розв'язків проблем, навчання з підкріпленням, інтелектуальних агентів і RAG-систем. З використанням усіх сучасних концепцій створення інтелектуального двигуна у перспективі доцільно виконувати, реалізуючи в ітераційний спосіб підготовчий і п'ять конструктивних кроків.

Підготовчий крок полягає у виборі інструментів. Найчастіше вибирають LangChain – для побудови ланцюжка RAG, Pinecone – для векторного пошуку, Sentence-BERT – для векторних представлень та ін. Прототипування передбачає перевірку різних варіантів.

Перший крок – це побудова LLM, позбавленої відомих обмежень. Так, запобіганню нестійкості моделі під час додавання нових навчальних матеріалів сприятиме концепція самовдосконалення з поєднанням дослідження (exploration) та експлуатації (exploitation) і стратегія зовнішніх винагород. Генеративні можливості LLM розширимо засобами розв'язання проблем за рахунок динамічного налаштування конфігурацій параметрів моделі для підтримки балансу, впровадження відповідних метрик, методів оцінювання і оптимізації [13]. Щоб використовувати LLM для інтерпретації, розуміння і використання

графічних елементів, які визначають порядок дій, вхідні і вихідні дані, іншу корисну для підтримки ЖЦ сервісів інформацію навчимо LLM перетворювати графічні зображення у структуровані машинозчитувані дані, які визначають схеми розв'язання проблем.

На другому кроці LLM інтегрується з RAG, компонентами якої є база знань та пошуковий і генеративний модулі. Щонайменше варто перевірити векторні бази даних Pinecone, Chroma або Milvus. Для пошуку в них релевантних документів і перетворення запитів користувачів у векторне представлення доцільно перевірити принаймні Sentence-BERT та OpenAI embeddings. Для створення текстових відповідей на основі знайдених пошуковим модулем даних варто перевірити такі сучасні моделі, як GPT-4, LLaMA 2, Anthropic Claude. Побудова бази знань, збір релевантних документів, їх індексація у векторній базі платформи підтримки ЖЦ сервісів мають враховувати всі відомі джерела даних – технічну документацію, бізнес-звіти, історичні дані, специфікації тощо. Адаптація моделі до доменної області ослабить обмеження у розумінні контексту. Для підвищення якості вмісту бази знань використовуватимемо регулярні оновлення та очищення. Зменшенню затримки пошуку сприятиме кешування для повторюваних запитів.

На третьому етапі створюється система інтелектуальних агентів для підтримки здатності інтелектуального двигуна розв'язувати проблеми користувачів. Перспективним вбачається підхід, побудований на основі моделей математичної логіки.

На четвертому етапі виконується навчання моделей системи, налаштування компонентів. Для пошукового компонента будемо виконувати оптимізацію пошукових запитів, ранжувати результати з використання метрик семантичної схожості. Для генеративного варто перевірити техніки fine-tuning і Промпт Інжинірінгу, інтегрувати механізми валідації результатів.

На п'ятому етапі виконується тестування системи. Щонайменше варто оцінювати точність відповіді, наприклад, з використанням метрики *Precision@k, продуктивність та час відповіді, перевірити працездатність концепцій і прийняти рішення про наступні кроки реалізації інтелектуального двигуна в ітеративному процесі прототипування.

Отже, концепція прототипування, покладена в основу сучасних методологій створення ІС дозволить реалізацію інтелектуального двигуна виконувати поступово, перевіряючи крок за кроком працездатність концепцій та їх ефективність. Спочатку доцільно створити прототип, інтегруючи прості моделі. Потім необхідно перевіряти й поліпшувати ключові здатності двигуна, використовуючи інші сучасні моделі та їх різні поєднання.

Перейдемо до перевірки працездатності прототипу інтелектуального двигуна. Розвиток прототипу буде предметом дослідження у наступних статтях.

Побудова й експериментальне дослідження прототипу.

Основні концепції. Використовується модель LLaMA 2, взаємодія LLM і RAG базується на процесах перетворення даних CSV у текстову базу знань, семантичного пошуку для отримання релевантного контексту, надання зазначеного контексту LLM для генерації відповіді. Основні кроки роботи системи можна представити у такий спосіб:

1. *Підготовка та завантаження даних у форматі CSV* – вміст CSV-файлу імпортується у структуру даних (DataFrame) із використанням бібліотеки Pandas.

2. *Обчислення семантичних векторних представлень* – для текстових фрагментів бази знань генерується векторне представлення, що відображає семантику тексту.

3. *Семантичний пошук релевантного контексту* для відповіді на запитання користувача. На основі косинусної міри подібності між векторним представленням тексту запитання користувача і векторами всіх записів бази знань записи упорядковуються за релевантністю. Вибирається запис із найбільшою косинусною мірою подібності.

4. *Формування підказки з контекстом для LLM* – вибрані текстові фрагменти (контекст) об'єднуються у підказку, яка передається LLM для формування відповіді.

5. *Виклик локальної мовної моделі для генерації відповіді* – підказка надсилається до LLM. Модель опрацьовує підказку, генерує підсумкову відповідь лише на основі наданих даних і повертає користувачеві. Передбачена ситуація, коли потрібна інформація відсутня.

Дані: CSV-файл з даними про продукти IBM, етапи їх ЖЦ. Таблиця містить 21 колонку з характеристиками (назва продукту, версія, дати їх анонсу, зняття з продажу, припинення підтримки тощо) і 13 506 рядків. Щоб зберегти контекст, кожен рядок CSV було перетворено у текстовий документ формату «Назва колонки: значення». База знань – список текстових фрагментів, кожен з яких відповідає одному продукту з його атрибутами.

Модель та інфраструктура: модель Llama 2 (версія від Meta), що в якості LLM генерує відповіді, розгорнута локально у режимі чату через Docker-сервіс з API. Інтерфейс сумісний з OpenAI, запити формуються як до OpenAI API, але обробляються локально. Це забезпечує конфіденційність – дані CSV і запити не надсилаються стороннім сервісам. Семантичний пошук реалізовано за допомогою моделі перетворення тексту у векторні представлення – з бібліотеки Sentence Transformers. Для порівняння протестовано три моделі представлення: all-MiniLM-L6-v2 (384-вимірна модель, збалансована за швидкістю та якістю); paraphrase-MiniLM-L3-v2 (полегшена модель з доступною швидкістю, яка поступається в точності семантичних збігів); all-mpnet-base-v2 (більша модель із високою точністю визначення семантичної схожості, але суттєво повільніша за попередні).

Усі 13,5k записів CSV одноразово трансформовані у векторну форму на початку експерименту. З 384-вимірних векторів формується векторний простір, семантично подібні тексти якого відповідають близьким векторним точкам. Модель ембеддінгів вибрано на основі балансу між швидкодією та точністю пошуку. Модель all-MiniLM-L6-v2 генерує вектори для всього корпусу за 4,8 с, тоді як all-mpnet-base-v2 – за 12,6 с. Час оброблення одного запиту (векторизація і пошук) моделлю all-MiniLM-L6-v2 становив 0,20 с (0,12 с на представлення запиту і 0,08 с на пошук), що майже вдвічі швидше, ніж моделлю all-mpnet-base-v2 (0,36 с сумарно). Водночас якість семантичного пошуку в all-mpnet-base-v2 дещо вища: Top-1 схожість – 0,91 проти 0,88 у all-MiniLM-L6-v2 (за шкалою 0-1). З огляду на ці результати було обрано модель all-MiniLM-L6-v2 як така, що забезпечує кращий баланс.

Процедура тестування: Для оцінювання точності було підготовлено набір із 30 тестових запитань користувачів таких типів:

- отримання конкретного атрибута продукту (наприклад, *«Яка дата закінчення підтримки сервера IBM Power модель X?»* на основі значень колонки End of Support);
- пошук продукту за назвою або кодом (наприклад, *«Коли вийшла версія 1.1.0 IBM Storage Suite for Cloud Paks?»* – потрібно знайти рядок з цією назвою та версією і вибрати дату);
- узагальнюючі питання, що вимагають опрацювання кількох релевантних записів (наприклад, *«Які продукти були зняті з продажу у 2020 році?»* – у відповіді очікується перелік або пояснення на основі знайдених даних);
- запитання *поза базою знань* для перевірки поведінки системи (наприклад, питання про неіснуючий продукт або про інформацію, якої гарантовано немає в таблиці).

Кожен запит тестувався у двох режимах: *RAG-режим* із повним циклом генерації відповіді (семантичний пошук, контекст і LLM); *Базовий режим* з генерацією відповіді LLM без надання контексту на основі власних знань (це базова лінія (baseline) для порівняння точності). Відповіді моделі фіксувалися для оцінювання коректності.

Умови тестування: автономне середовище без доступу до інтернету. Llama 2 працювала на апаратному забезпеченні із GPU NVIDIA (Tesla T4) для пришвидшення генерації тексту та обчислення векторних представлень. Семантичний пошук здійснювався

в оперативній пам'яті. Щоб успішність відповідей у RAG-режимі визначалася лише релевантним контекстом, а не «знаннями» моделі, перед початком тестування було перевірено, що модель не була попередньо навчена на цьому датасеті.

Для оцінювання точності результати перевірялися вручну: відповідь правильна, якщо відповідала фактам з таблиці CSV; відповідь неправильна, якщо містила фактологічні помилки або відсилала до даних, яких немає у CSV. Якщо модель відповіла на запити четвертого типу, що даних немає, відповідь теж приймалася як правильна (відсутність галюцинації). Після отримання усіх відповідей, за формулою Вілсона для біноміальної пропорції, обчислено відсоток правильних відповідей та 95 % довірчий інтервал. Для відокремлення помилок пошуку від помилок генерації для кожного запиту фіксувалося, чи був знайдений правильний запис – топ-3 контекст містив необхідну інформацію.

Результати експерименту

Точність відповідей: Із 30 запитань 27 були правильно оброблені системою, що становило 90 %. З них 27 випадків модель у 25 відповіла фактично правильно, використовуючи надані фрагменти даних, а у 2 випадках коректно повідомила, що потрібної інформації немає (наприклад, на питання про продукт, відсутній у таблиці, модель відповіла приблизно: «На жаль, даних про такий продукт немає в базі» – що ми вважаємо правильною поведінкою). Три помилки (10 %) сталися на запитах, де модель або некоректно інтерпретувала знайдені дані, або пошук повернув близькі, але не ті записи. Наприклад, на питання про дату зняття з підтримки одного з продуктів модель помилилася на 1 рік, імовірно через те, що в контекст потрапили дані про схожий продукт іншої версії. Отримана точність підтверджує гіпотезу 1, адже LLM без контексту не впоралася з жодним із цих запитів. Обчислений для показника 90 % точності 95 % довірчий інтервал становив приблизно 10 % при n = 30. Це означає, що з імовірністю 0,95 точність лежить у межах 80-100 %. Це доволі широкий інтервал через відносно невеликий обсяг тестів. При розширенні тестового набору статистична похибка зменшиться. Отже, беручи до уваги нульову гіпотезу повної випадковості (0 % успіху), можна стверджувати, що точність перевищує поріг у 50 %.

Рівень галюцинацій: галюцинації не зафіксовано. Модель давала відповіді строго на основі знайдених фактів або правильно вказувала на відсутність даних. Отже, RAG-підхід значно знижує частоту вигаданих відповідей. Для порівняння, в режимі без контексту LLM «вигадувала» відповіді – наприклад, на питання про дату закінчення підтримки вигаданого продукту модель спершу дала ймовірну, але неправильну відповідь (галюцинацію).

Ефективність семантичного пошуку. В усіх 30 випадках потрібна інформація, якщо вона існувала в базі, була серед перших трьох фрагментів контексту. Тобто повернення по базі знань становило 100 % для тестових запитів і жоден запит з відповіддю, що наявна у CSV, не залишився без релевантного фрагмента в контексті. При цьому у 26 випадках правильний запис стояв першим (Top-1), ще у 1 випадку – другим. Для обраної моделі all-MiniLM-L6-v2 середній показник Top-1 similarity для запитів склав близько 0,87, а Top-3 average similarity близько 0,84. Тобто найрелевантніший документ має дуже високий косинусний перетин із запитом, а два наступні теж доволі близькі. На практиці такі значення підтверджують надійність – у векторному просторі запит знаходився близько до правильного рядка і той суттєво відрізнявся від нерелевантних (схожість інших записів різко спадала). Для ілюстрації, семантичний пошук зміг правильно зіставити запит «BladeCenter HS22» із записом "BladeCenter HS22 (7809-H22) – Withdrawal notification", навіть якби у питанні не було точного збігу за деякими полями. Ключова перевага – стійкість до формулювань запиту: система знайде потрібний запис навіть якщо користувач використовує синоніми чи неповну назву, чого не гарантує ключовий пошук.

Часові результати. Середній загальний час отримання відповіді прототипом становив близько 2-3 секунд. Цей час включає близько 0,2 с на семантичний пошук (0,12 с на перетворення запиту і 0,08 с на пошук по більш ніж 13k записах) та додатково близько 2 с на генерацію тексту LLM (довжина відповіді зазвичай становить 1-2 речення). Затримка знаходиться в комфортних межах для користувача. Щодо часу індексації – 13 506 рядків CSV перетворюються на вектори за близько 5 секунд на GPU для обраної моделі. Тобто навіть при оновленні бази знань чи запуску прототипу на новому датасеті оброблення 10-15 тисяч записів займе лічені секунди, що цілком прийнятно. Часові оцінки свідчать, що прототип можна масштабувати на більші об'єми даних, проте варто врахувати лінійне зростання часу пошуку. Наприклад, для 135 000 записів (у 10 разів більше) пошук займав би близько 0,8 с, що все ще допустимо. За потреби можна використати спеціалізовану векторну базу, наприклад, ChromaDB, Faiss для швидшого пошуку на мільйонах документів. Але при 10-15 тисяч записів прототип продемонстрував добру продуктивність.

Порівняння з базовими підходами

Для повноти оцінки результати RAG-методу були зіставлені з двома підходами.

LLM без доступу до знань (закрита книга) без наданого контексту не відповіла правильно на питання. Лише 2 відповіді з 30 можна було вважати частково правильними. Наприклад, на питання про рік анонсу деякого старого продукту модель назвала 2015, що збіглося з реальною датою. Решта 28 відповідей цієї моделі були неправильними або занадто загальними. Таким чином, точність LLM без доступу до знань становила близько 7 % проти 90 % для прототипу. Це узгоджується з висновками інших дослідників.

Ключовий пошук по тексту таблиці CSV за допомогою індексування всіх текстових даних і пошуку рядків, які містять слова запиту, на тих же запитаннях продемонстрував кращі показники, ніж LLM без доступу до знань, але значно гірші ніж прототип. У простих випадках (назва продукту або код точно згадані в питанні) він дозволяє знайти відповідний запис. Проте його ефективність різко падає, якщо запит не збігається буквально з текстом у таблиці. Наприклад, запит *«Чи є в назві продукту X слово Storage?»* вимагав би розпізнати синонімію чи логічний зв'язок, що не притаманне лексичному пошуку. Ключовий підхід відпрацював некоректно приблизно 20-25 % запитів, тоді як семантичний пошук дав релевантні результати для всіх. Цим підтверджено *гіпотезу 2*: використання семантичних векторів дозволяє «розуміти» запитання користувача і знаходити інформацію, навіть якщо слова не збігаються точно.

Вибір моделі перетворення визначають вимоги до швидкості і точності. Модель all-MiniLM-L6-v2 в експерименті була найкращою – у 5 разів швидшою за all-mpnet-base-v2 в індексації і вдвічі швидшою в обробленні запиту за мінімальної втрати точності пошуку (схожість Top-1 становила 0.88 проти 0.91). Отже, для середніх обсягів даних можна обрати легшу модель без суттєвого погіршення якості відповіді. Більш повільні моделі доцільно використовувати лише якщо пріоритетом є максимальна точність і дозволяє час.

Дані експериментів наведені у таблиці 1.

Використані для експерименту моделі – all-MiniLM-L6-v2, paraphrase-MiniLM-L3-v2, all-mpnet-base-v2 – описані вище. Вони оцінюються за такими показниками:

1) час генерації векторних представлень (Embedding Time (Corpus)) для всіх рядків CSV у секундах. Цей показник важливий для оцінки масштабованості рішення;

2) час перетворення одного запиту користувача на вектор (Embedding Time (Query)) у секундах. Це ключовий параметр, якщо користувач очікує швидкої відповіді;

3) час обчислення схожості між запитом та всіма векторами бази (Search Time). Фактично цей показник репрезентує швидкість пошуку релевантного контексту.

4) значення косинусної подібності (Top-1 Similarity) для найбільш релевантного запису. Чим ближче його значення до верхньої границі інтервалу (0, 1), тим більший збіг;

5) середня подібність (Top-3 Avg Similarity) для трьох найрелевантніших записів. Показник свідчить про один сильний збіг, чи кілька добрих, що важливо для оцінювання стабільності та надійності результатів.

Таблиця 1 – Експериментальні дані дослідження прототипу

Назва моделі	Час генерації векторних представлень, с	Час перетворення запиту на вектор, с	Search Time, с	Top-1 Similarity	Top-3 Avg Similarity
all-MiniLM-L6-v2	4,8	0,12	0,08	0,88	0,85
paraphrase-MiniLM-L3-v2	3,2	0,09	0,07	0,82	0,79
all-mpnet-base-v2	12,6	0,24	0,12	0,91	0,89

Джерело: розроблено автором.

Дані експериментів свідчать, що ефективність взаємодії LLM і RAG-системи залежить від вибраних векторних представлень і метрики подібності. Модель all-MiniLM-L6-v2, використана для семантичного кодування, підтримує баланс між швидкістю та якістю. Вона демонструє вищу, ніж інші моделі швидкість при високих семантичних оцінках. Підтверджено, що реалізований варіант взаємодії LLM і RAG є ефективним у проєктах з CSV-файлами, які мають невелику або середню кількість записів. Його використання у проєктах з великими CSV-файлами вимагатиме для швидкого пошуку використання спеціалізованих векторних баз даних або розбиття даних на тематичні блоки.

Прототип рішення з використанням даних у форматі CSV підтвердив переваги підходу, коли на запит користувача система надає релевантну відповідь з генеративним поясненням, спираючись на результати семантичного пошуку у зовнішньому джерелі в контексті проблеми користувача. Це уможливлює створення інтелектуальних асистентів, які допоможуть розв’язувати проблеми користувачів із використанням внутрішніх даних провайдера, забезпечуючи вимоги як до точності, так і конфіденційності системи.

Продемонстрована ефективна інтеграція взаємодії LLM і RAG-системи забезпечує підвищення ефективності використання накопичених даних і розширення сфери застосування LLM і RAG-систем для підтримки процесів ЖЦ сервісів.

Висновки. У статті розглянута проблема розроблення інтелектуального двигуна як основи інтеграції засобів автоматизації процесів ЖЦ сервісів, побудови моделей та методів для розроблення інструментів платформи підтримки ЖЦ сервісів у ІС-провайдерів ІКП.

Запропоновано загальний підхід до вирішення проблеми. Інтелектуальний двигун, реалізований на основі відповідно структурованої і навченої LLM та RAG-системи, виступає в ролі асистента команди підтримки ЖЦ сервісів.

Проведене дослідження кількісно продемонструвало переваги інтеграції зовнішніх табличних даних з LLM через RAG-підхід. Операціоналізована мета досягнута – отримано близько 90 % точних відповідей при нульових випадках галюцинацій. Ключові показники ефективності – точність відповідей, повнота пошуку, затримка – знаходяться у задовільних межах. Це підтверджує висновок – зниження частки помилкових відповідей та вигаданих фактів до нуля є наслідком надання актуального контексту моделі. Підтверджено, що навіть відносно простий семантичний пошук (на основі MiniLM) здатен забезпечити повне покриття інформаційних запитів по базі знань, тоді як традиційні підходи поступаються.

Без доповнення знаннями LLM генерувала неправильні відповіді у приблизно 93 % випадків. Поєднання LLM із зовнішньою базою знань різко підвищило продуктивність, узгоджуючись із сучасними дослідженнями в цій галузі. Підтверджено як гіпотезу 1, так і гіпотезу 2 – завдяки векторному представленню досягнуто 100 % пошуку необхідних даних у таблиці, незалежно від формулювань запиту, що було б складно для простого пошуку.

Окрім того, експериментальне дослідження дозволило зробити висновок про те, що ефективність LLM з RAG-системою дуже залежить від якості векторних представлень і вибору відповідної моделі, при цьому швидкодія системи відповідає інтерактивним вимогам – затримка пошуку складає менше ніж 0,5 с при 13k документів, генерація відповіді вимагає близько 2 с, що є цілком прийнятним. Встановлено, що збалансована модель MiniLM забезпечує компроміс, але в інших доменах можливо варто пробувати кілька варіантів перетворень та метрик схожості. Базова реалізація показала добру масштабованість для середніх датасетів, але при зростанні обсягів даних доцільним буде використання розвинених рішень – векторних баз даних, шардування даних тощо.

Отже, експериментальна перевірка підтвердила працездатність запропонованого рішення, перспективи його розвитку і практичне значення інтеграції RAG-системи з можливостями LLM. Це допомагає LLM розв'язати більше проблем підтримки процесів усіх етапів ЖЦ сервісів, при цьому значно рідше генеруючи неправильну або неактуальну інформацію. Отримані кількісні результати точності та інших показників, підтверджені гіпотези, зручність подачі інформації користувачу підтверджують, що інтеграція структурованої бази знань і LLM відкриває можливості створення приватних помічників та аналітичних систем, які здатні відповідати на вузькоспеціалізовані питання, спираючись на внутрішні дані організацій, забезпечуючи при цьому і точність, і конфіденційність.

Запропонований підхід дозволить працівникам ІТ-компанії і провайдера аналізувати проблеми і визначати вимоги до ІС, будувати архітектуру сервісів, виконувати завдання, пов'язані з підтримкою процесів ЖЦ сервісів.

Список використаних джерел

1. Чимшир, В., Теленик, С., Ролік, О. & Жаріков, Е. (2023). Платформа підтримки життєвого циклу сервісів в інформаційних системах провайдерів інформаційно-комунікаційних послуг. *Міжвідомчий науково-технічний збірник Адаптивні системи автоматичного управління*, *1 (42)*, 65-78. https://doi.org/10.20535/1560-8956.42.2023.279172

2. Chymshyr, V., Zhdanova, O., Havrylenko, O., Nowakowski, G. & Telenyk, S. (2024). Models and methods for forming service packages for solving of the problem of designing services in information systems of providers. *Inf. Comput. and Intell. syst. j., 2*, 29-54. https://doi.org/10.20535/2786-8729.5.2024.316432

3. Morelli, N., De Götzen, A., & Simeone, L. (2020). Service design capabilities (Springer Series in Design and Innovation, Vol. 10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56282-3.

4. Zubiaga, A. (2024). Natural language processing in the era of large language models. Frontiers in Artificial Intelligence, 6, 1-5. https://doi.org/10.3389/frai.2023.1350306.

5. Nagavalli, S. P., Tiwari, S., & Sarma, W. (2024). Large language models and NLP: Investigating challenges, opportunities, and the path to human-like language understanding. International Research Journal of Engineering and Technology, 12(11), 571-584.

6. Lu, P., Chen, B., Liu, S., Thapa, R., Boen, J., & Zou, J. (2025). OctoTools: An agentic framework with extensible tools for complex reasoning. In *ICLR 2025 Workshop on Foundation Models in the Wild*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.11271.

7. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., et al. (2020). Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks. *Advances in Neural Information Processing Systems, 33*, 9459-9474. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.11401.

8. Tanko Ishaya. (2012). A service oriented approach to Business Intelligence in Telecoms industry. *Telematics and Informatics*, *3(29)*, 273-285. https://doi.org/10.1016/j.tele.2012.01.004.

9. Daidj, N. (2022). Towards renewed Business-IT alignment models in the digital era: The impact of data inclusion. *Information Resources Management Journal, 35*(1), 1-13. https://doi.org/10.4018/IRMJ.298972.

10. MacLean, D. & Titah, R. (2023). Implementation and impacts of IT Service Management in the IT function. *International Journal of Information Management*, *70*, 1-53. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102628.

11. Sun, Y., White, J., Eade, S., & Schmidt, D. C. (2016). ROAR: A QoS-oriented modeling framework for automated cloud resource allocation and optimization. *Journal of Systems and Software, 116*, 146-161. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.006.

12. Tuunanen, T., Salo, M., & Li, F. (2023). Modular service design of information technology-enabled services. *Journal of Service Research*, *26(2)*, 270-282.

13. Wan, J., Song, S., Yu, W., Liu, Y., Cheng, W., Huang, F., et.al. (2024). Omniparser: A unified framework for text spotting key information extraction and table recognition. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 15641-15653).

References

1. Chymshyr, V., Telenyk, S., Rolik, O., Zharikov, E. Platforma pidtrymky zhyttievoho tsyklu servisiv v informatsiinykh systemakh provaideriv informatsiino-komunikatsiinykh posluh [Platform for supporting the life cycle of services in information systems of information and communication service providers]. *Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia – Interdepartmental scientific and technical collection Adaptive systems of automatic control, 1 (42)*, 65-78. DOI: https://doi.org/10.20535/1560-8956.42.2023.279172.

2. Chymshyr, V., Zhdanova, O., Havrylenko, O., Nowakowski, G. & Telenyk, S. (2024). Models and methods for forming service packages for solving of the problem of designing services in information systems of providers. *Inf. Comput. and Intell. syst. j., 2*, 29-54. DOI: 10.20535/2786-8729.5.2024.316432.

3. Nicola Morelli, Amalia de Götzen & Luca Simeone. (2020). Service Design Capabilities, Springer Series in Design and Innovation, vol. 10, 89 p. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-56282-3_8.

4. Arkaitz Zubiaga. (2024). Natural language processing in the era of large language models / Frontiers in Artificial Intelligence, 6, 1-5. doi.org/10.3389/frai.2023.1350306.

5. Sudarshan Prasad Nagavalli, Sundar Tiwari, Writuraj Sarma. (2024). Large Language Models and NLP: Investigating Challenges, Opportunities, and the Path to Human-Like Language Understanding. *International Research Journal of Engineering and Technology*, *12(11)*, 571-584.

6. Lu, P., Chen, B., Liu, S., Thapa, R., Boen, J. & Zou, J. (2025). OctoTools: An Agentic Framework with Extensible Tools for Complex Reasoning. *Proceedings of the ICLR 2025 Workshop on Foundation Models in the Wild.* https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.11271.

7. Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., et. al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. Advances in Neural Information Processing Systems, 33. 9459-9474. https://doi.org/10.48550/ arXiv.2005.11401.

8. Tanko Ishaya. (2012). A service oriented approach to Business Intelligence in Telecoms industry. *Telematics and Informatics*, *3(29)*, 273-285. https://doi.org/10.1016/j.tele.2012.01.004.

9. Nabyla Daidj. (2022). Towards Renewed Business-IT Alignment Models in the Digital Era:The Impact of Data Inclusion. *Information Resources Management Journal*, *1(35)*, 1-13. DOI: 10.4018/IRMJ.298972.

10. Don MacLean, Ryad Titah. (2023). Implementation and impacts of IT Service Management in the IT function. *International Journal of Information Management*, *70*, 1-53. https://doi.org/10.1016/ j.ijinfomgt.2023.102628.

11. Sun, Y., White, J., Eade, S., Schmidt, D. C. (2016). ROAR: A QoS-oriented modeling framework for automated cloud resource allocation and optimization. *Journal of Systems and Software*, *116*, 146-161. Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.006.

12. Tuunanen, T., Salo, M., Li, F. (2023). Modular service design of information technology-enabled services. *Journal of Service Research*, *26(2),* 270-282.

13. Wan, J., Song, S., Yu, W., Liu, Y., Cheng, W., Huang, F., et.al. (2024). Omniparser: A unified framework for text spotting key information extraction and table recognition. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 15641-15653).

Отримано 04.09.2025

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

UDC 004.75

***Viacheslav Chymshyr*[1]**

[1]PhD student, Department of Information Systems and Technologies
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: vchimshir@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0005-2555-5373

INTELLIGENT ENGINE AND MODELS AND METHODS OF THE PLATFORM FOR COMPREHENSIVE SUPPORT OF THE LIFE CYCLE PROCESSES OF INFORMATION AND COMMUNICATION SERVICES

The problem of developing an intelligent engine as a basis for integrating tools for automating service life cycle processes, models and methods for developing initiation and business analysis tools for a service life cycle support platform in information systems of providers is considered. The general approach to supporting processes at all stages of the service life cycle is proposed. The intelligent engine acts as an assistant to the service life cycle support team. The intelligent engine is implemented based on the suitably structured and trained large language model. To communicate with users in the context of problems, the large language model is integrated with external knowledge bases using a generation system with augmented knowledge search. Information structured in accordance with the problem helps the large language model to form a correct and understandable answer for users considering the problem. For the stages of initiation and business analysis, requirements identification and service architecture construction, appropriate models and methods are proposed, implemented within the framework of the general approach, the procedure and features of which are prompted by the assistant.

Modern technologies were used to implement the solution prototype. The DataFrame structure and Pandas library were used to populate the knowledge base. Vectorization of representations and semantic search of relevant context were performed using the all MiniLM L6 v2 model. The formation of a prompt with context for a large language model, response generation were implemented using the open Llama 2 model in the form of a Docker service.

An experimental study of the prototype was performed with a comparison of the all-MiniLM-L6-v2, paraphrase-MiniLM-L3-v2 and all-mpnet-base-v2 models according to these accepted metrics as the time of generation of vector representations, the time of conversion of one user query into a vector, the time of calculation of similarity between the query and all vectors of the base, cosine and average similarity confirmed the operability of the proposed solution. The percentage of relevant responses to user queries increased. The implemented option is quite effective in projects with a small or medium number of records. Its use in projects with large databases will require dividing the database into thematic blocks for quick searching.

Keywords: *service approach; infocommunication services; service life cycle; artificial intelligence; Large Language Model (LLM).*

Table: 1. References: 31.

Чимшир В. І. Інтелектуальний двигун і моделі та методи платформи комплексної підтримки процесів життєвого циклу інфокомунікаційних сервісів. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 284-295. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-284-295.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-296-309
UDC 004.9:[504.4.054+355.015]

Phoenix Serhiiovych Aartvork[1], Olena Vasylivna Trunova[2]

[1]PhD Student of the Department of Information Technology and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: nicksnickslaw@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-1129-1322

[2]PhD in Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technology and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: e.trunova@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0689-8846
ResearcherID: G-3925-2014. **Scopus Author ID:** 57211429427

DESIGNING A SOFTWARE PLATFORM FOR OPERATIONAL MONITORING OF WATER RESOURCES BASED ON THE INTERNET OF THINGS

The relevance of this study is driven by the critical damage to water supply infrastructure in the de-occupied territories of Ukraine, which creates acute risks of anthropogenic contamination of water resources and highlights the inefficiency of traditional monitoring methods.

The core problem lies in the absence of an integrated software platform capable of ensuring the rapid and reliable collection, transmission, and analysis of data under unstable connectivity, enabling quick deployment, and integrating with emergency response systems.

The aim of this article is to develop and substantiate the conceptual architecture of a specialized software platform based on the Internet of Things (IoT), adapted to these challenges.

The study proposes a detailed four-layer architecture, comprising a sensing layer with a modular design for monitoring specific threats (heavy metals, petroleum products), a network layer employing a hybrid approach (LPWAN/4G) and the MQTT protocol to ensure guaranteed data delivery, a data processing and storage layer based on cloud services, an MQTT broker, a machine learning module, and a multi-model data repository, and an application and presentation layer that integrates a web dashboard, mobile applications, an alerting system, and APIs for system integration.

The conclusions indicate that the proposed architecture provides a foundation for developing a fault-tolerant and scalable platform, enabling a shift from reactive to proactive environmental safety management, supporting informed real-time decision-making, and promoting the sustainable recovery of affected territories.

Keywords: *Internet of Things (IoT); operational monitoring; water resources; de-occupied territories; environmental safety; software platform architecture; fault tolerance; autonomous sensors.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 27.

Relevance of the research. The ongoing military actions in Ukraine have caused critical damage to water supply infrastructure and wastewater treatment facilities, creating acute risks of technogenic contamination of water resources [1]. The situation in the Seym River basin vividly illustrates the extent of this environmental vulnerability. According to official data [2], there has been a significant deterioration in water quality: the chemical oxygen demand (COD) has risen to 104,2 *mg/dm³* (with the standard limit being 30 *mg/dm³*), the concentration of ammonium nitrogen has exceeded the permissible threshold, and the level of dissolved oxygen has dropped far below the critical minimum.

These conditions expose fundamental shortcomings of traditional monitoring methods based on periodic sampling. Among them are: the considerable time lag between an incident and its detection, caused by logistical constraints and the duration of laboratory analyses; the low spatiotemporal resolution, which creates “blind zones” where short-term yet intense pollution events remain undetected; and, as a result, the predominantly reactive nature of control, which merely records pollution retrospectively and prevents timely measures to contain its spread.

The above limitations highlight the urgent need to adopt a paradigm of operational (crisis) monitoring – intensive observation of natural systems in near real-time within environmentally stressed areas [3, 4]. The central goal of this approach is to ensure immediate response to emergencies, enabling their effective containment, mitigation, and the minimization of adverse consequences.

Accordingly, the relevance of this study lies in the scientific and technical justification and design of a specialized software platform based on the Internet of Things (IoT). This platform serves as a technological tool capable of implementing the principles of operational monitoring

© P. S. Aartvork, O. V. Trunova, 2025

and ensuring the transition from delayed, reactive responses to proactive, data-driven management of environmental safety. The development of a flexible, scalable, and fault-tolerant solution is critically important for the sustainable recovery of affected areas, the protection of public health, and the preservation of biodiversity.

Problem statement. The core issue addressed in this article is the absence of a comprehensive software platform capable of effectively handling the tasks of real-time collection, transmission, storage, processing, and visualization of heterogeneous data from IoT sensor networks in the unstable environment of de-occupied territories. Existing systems are not designed to operate under crisis conditions and fail to meet three critical requirements:

1. Fault tolerance under unstable connectivity. Damaged infrastructure demands that the platform be capable of autonomous operation with guaranteed data synchronization once communication is restored – an essential condition for uninterrupted monitoring.

2. Rapid and flexible deployment. Post-war conditions require "plug-and-play" functionnality, enabling the swift deployment of new monitoring points without significant time or resource expenditures for integration.

3. Interoperability with response systems. Monitoring data must be automatically and seamlessly integrated with the information systems of the State Emergency Service, local administrations, and environmental agencies to support timely decision-making, unlike existing siloed solutions.

Thus, the task is not to develop yet another monitoring system, but rather to design a specialized, adaptive architecture that meets the requirements of fault tolerance, rapid deployment, and seamless integration into a unified crisis management framework.

Analysis of recent studies and publications. A review of current approaches to water resource monitoring indicates active adoption of digital technologies. In Ukraine, initiatives have emerged that are mainly focused on data visualization, such as the "e-Water" project [5] and systems built on the ArcGIS platform [6, 7]. At the same time, international experience demonstrates a shift toward integrated monitoring systems [8, 9]. However, most existing solutions do not account for the specific challenges of operating in areas with damaged infrastructure, which underscores the relevance of this research.

Most such platforms are based on a generalized three-tier architecture (data collection, processing, and presentation) [8, 10, 11]. Yet, for crisis conditions, as emphasized by Ashraf U. et al. [12] and Poke B. [13], this is insufficient, since the reliability of data transmission becomes critical and requires detailed examination at each technological level.

At the data collection level, the key challenges are energy efficiency and reliability. For instance, to reduce network load and improve responsiveness, Attallah N. A. [14] investigated the use of edge computing – primary data processing directly on sensor nodes. For transmitting such data over long distances, research by Pires L. M. [15] shows that LPWAN technologies (LoRaWAN, NB-IoT) are effectively applied. Moreover, to ensure guaranteed information delivery under unstable connectivity, studies by Ghosh D. et al. [11] confirm the effectiveness of the lightweight MQTT protocol due to its support for Quality of Service (QoS).

Once the data reach the server, the challenges shift to efficient processing and storage. In particular, to manage large-scale data streams, Pacella M. et al. [16] highlight the use of scalable cloud frameworks. At the storage stage, Liu P. [17] substantiates the advantages of specialized time-series databases (TSDB), such as InfluxDB, while practical aspects of their integration with MQTT are discussed in EMQ Technologies [18]. Finally, for data analysis, Khattach O. et al. [19] propose the use of machine learning pipelines for real-time processing, whereas Shahid M. et al. [20] further advance this approach by developing predictive models for water quality.

Identification of unexplored aspects of the general problem. A critical review of existing solutions shows that they often fail to account for the unique combination of challenges essential for operational monitoring under crisis conditions. In particular, comprehensive research is lacking in the following areas:

- Absence of architectural patterns that ensure uninterrupted data collection, data integrity, and overall system fault tolerance under frequent connectivity disruptions.
- Lack of models enabling flexible integration of new sensors on a "plug-and-play" basis, which is crucial for the rapid expansion of monitoring networks in environments with restricted access and high risks.
- Existing solutions are limited to visualization, whereas what is needed is deep, seamless integration with the information systems of the State Emergency Service, local administrations, and environmental agencies to support automated decision-making.
- No studies provide recommendations on the optimal combination of technologies (databases, message brokers) that best meet performance and reliability requirements for monitoring tasks in crisis conditions.

Research in the field of IoT systems frequently addresses either hardware aspects or generalized cloud solutions, overlooking the specific requirements of platform design in post-war reconstruction settings, where fault tolerance, adaptability, and deployment speed are of critical importance.

The purpose of this article is to develop and substantiate a conceptual IoT-based software platform architecture for operational monitoring and analysis of water resources in de-occupied territories.

The objectives include identifying the key functional components of the platform, descrybing their interrelations, and selecting the core technologies for their implementation.

Presentation of the Main Material. To address this objective, a multi-layered event-driven architecture (EDA) of the software platform is proposed (Fig. 1), consisting of four logical tiers.

In contrast to the more generalized three-tier model, this architecture explicitly distinguishes the network layer to emphasize the critical aspects of data transmission under unstable connectivity conditions. Such an approach makes it possible to design the system with due consideration of the key requirements for fault tolerance, scalability, and the timeliness of water resource monitoring in de-occupied territories.

1. *Sensor Layer (Data Collection).* This layer is responsible for interacting with the physical environment and for primary data acquisition. Its main objective is the reliable and autonomous collection of baseline data on the state of water resources through a network of intelligent sensor nodes.

1.1. Network of Autonomous IoT Sensors. At the core of this layer lies a network of autonomous nodes equipped with specialized sensors for measuring key water quality indicators, such as:

- pH (acidity/alkalinity);
- temperature (indicator of thermal pollution);
- turbidity (presence of suspended particles);
- dissolved Oxygen (DO) (indicator of organic pollution);
- electrical Conductivity (EC) (concentration of dissolved ions).

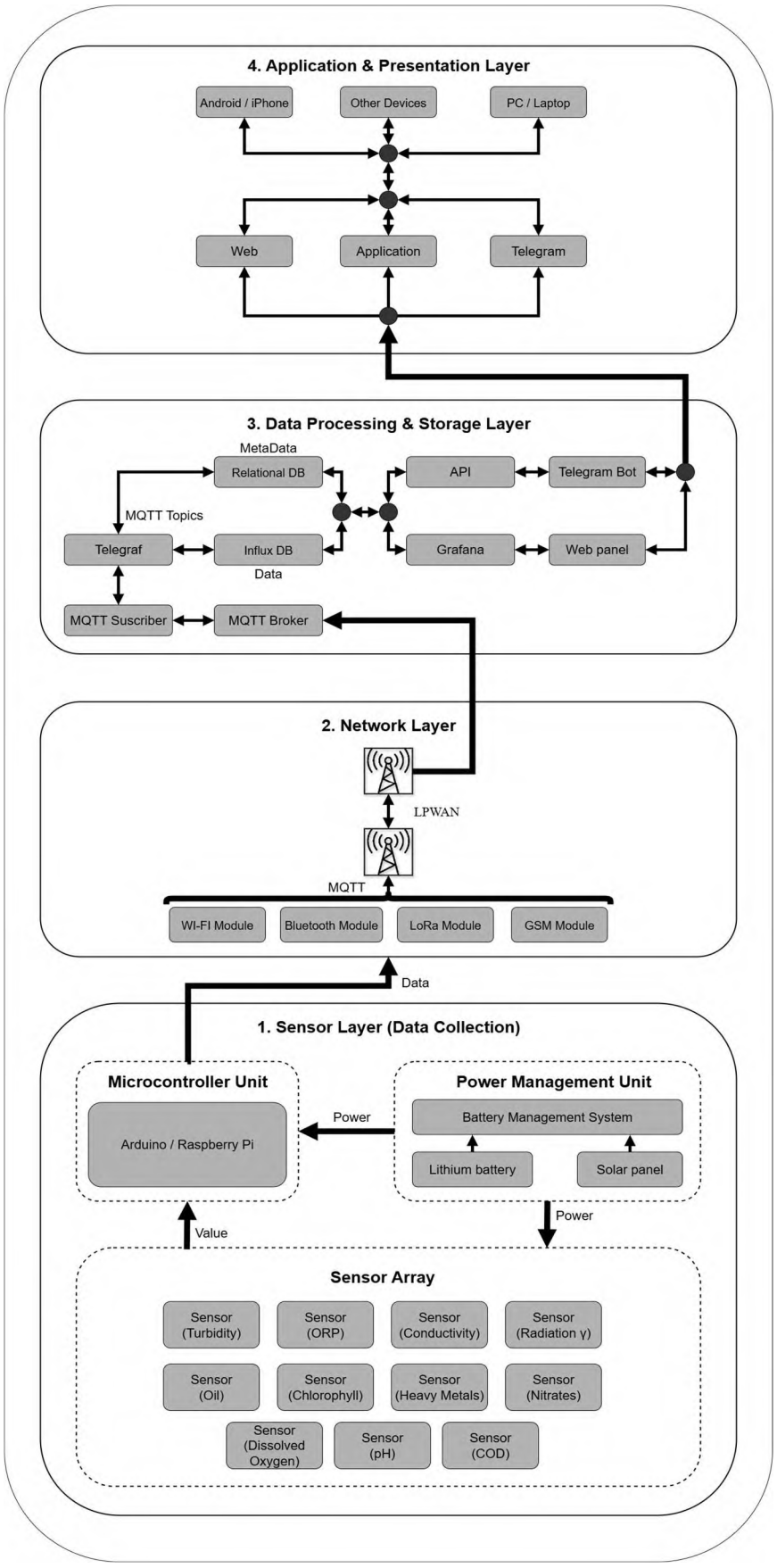


Fig. 1. Architecture for processing and reproducing monitoring data

For de-occupied territories, in addition to standard hydrochemical indicators, priority must be given to monitoring specific threats arising from military activities. Therefore, the integration of sensors for detecting the following becomes particularly relevant:

– heavy metals (lead, cadmium, and mercury), which enter water bodies due to the destruction of industrial facilities and the disposal of munitions;

– petroleum products and nitrates (as indicators of residual explosives), which result directly from the destruction of military equipment and leaks from damaged storage facilities;

– increased radiation background, serving as an indicator of widespread environmental contamination [21].

In designing the architecture, two approaches to equipping sensor nodes were considered: the use of integrated multiparameter probes and the deployment of networks of individual specialized sensors. For conditions where fault tolerance and maintainability are key requirements, the latter approach was chosen. Unlike a multiparameter probe, which constitutes a single point of failure, the malfunction of an individual specialized sensor does not lead to a complete shutdown of monitoring. This modular principle ensures graceful degradation of the system and greatly simplifies its scalability, which is critically important for adaptive crisis management.

The operational and technical characteristics of the main types of sensors that affect overall system reliability are summarized in Table 1.

Table 1 – Operational and technical characteristics of the main types of sensors

№	Sensor type	Typical measurement range	Typical error	Protection class (IP)	Intercalibration interval (typical)	Service life (typical)
1	pH sensor	0-14.00 pH	± 0,15 pH	IP68	1-3 months	1-2 years
2	ORP sensor	-1999…+1999 mV	≤ ± 5 mV	IP68	1-3 months	1-2 years
3	Dissolved oxygen (DO) sensor	0-20 *mg/L*	± 3 % FS	IP68	6-12 months	3-5 years
4	Electrical conductivity (EC) sensor	1-20000 *µS/cm*	± 1 % FS	IP68	6-12 months	3-5+ years
5	Turbidity sensor	0-4000 NTU	± 5 % FS	IP68	6-12 months	3-5+ years
6	COD sensor	0-500 *mg/L*	± 5 % FS	IP68	3-6 months	2-3 years
7	Chlorophyll sensor	0-400 *µg/L*	± 5 % FS	IP68	6 months	3-5 years
8	Petroleum products sensor	0-50 *ppm*	± 5 % FS	IP68	6 months	3-5 years
9	Heavy metal sensor	0,01-10 *mg/L*	± 10 % FS	IP68	3-6 months	2-3 years
10	Nitrate sensor	0-100 *mg/L* (NO_3^-)	± 5 % FS	IP68	3-6 months	2-3 years
11	Radiation sensor (Gamma)	0,01-1000 *µSv/h*	± 15 %	IP65	12 months	5+ years

Source: developed by the authors.

As shown in the table, the system components have different maintenance cycles. The frequent calibration requirements of pH electrodes, in contrast to the long-term stability of turbidity sensors, make the modular architecture the only rational choice. It enables targeted maintenance of only the "demanding" components without interrupting the operation of the entire station, thereby minimizing operational costs.

1.2. Data Transmission Protocols. For transmitting data from sensor nodes, the lightweight MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol is proposed. Its key advantages for IoT solutions include low bandwidth requirements and effective support for Quality of Service (QoS). The use of QoS levels 1 ("at least once") or 2 ("exactly once") guarantees data delivery even in the event of temporary communication disruptions, which is a fundamental requirement for operational monitoring.

1.3. Edge Computing. At this level, preliminary data processing is carried out directly on sensor nodes or local gateways. This includes noise filtering, data aggregation (e.g., averaging values over a specific interval), validation (checking data against predefined ranges to filter out anomalous values caused by sensor malfunctions), as well as temporary local storage in case of connectivity loss. Such processing significantly reduces the load on the transmission network, optimizes bandwidth usage, and ensures faster responses to local events, thereby increasing system resilience. This approach supports operational monitoring by enabling real-time collection of critical indicators for the rapid detection of emergency situations.

2. *Network Layer*. The network layer ensures reliable and energy-efficient transmission of data from autonomous sensor nodes to the central platform. Its architecture consists of two key components: wireless access technologies and data transmission protocols.

2.1. Wireless Access Technologies. Sensor nodes are equipped with robust communication modules selected with consideration of coverage, energy efficiency, and bandwidth under unstable infrastructure conditions. A hybrid approach is proposed:

– LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) provides wide coverage and ultra-low power consumption for transmitting small volumes of data at high frequency, making it ideal for baseline monitoring.

– 4G/LTE Cat-M1 offers higher bandwidth for transmitting larger datasets or for nodes requiring faster information exchange.

Additionally, to enhance the system's resilience to failures – a critical factor under damaged infrastructure conditions – the use of self-organizing sensor networks (mesh networks) is considered. In such networks, nodes are capable of relaying each other's data, thereby creating alternative routes in case of individual node or base station failures, which significantly increases overall fault tolerance.

2.2. Data Transmission Protocols. At the application level, the lightweight MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol is proposed. It has become the de facto standard for IoT solutions due to its low bandwidth requirements, resource efficiency, and reliable support for Quality of Service (QoS).

To substantiate this choice, a comparative analysis of the main protocols in the context of operational monitoring tasks is provided (Table 2).

Table 2 – Comparative analysis of data transfer protocols

№	Protocol / Technology	Transport / Model	QoS / Reliability	Typical applications	Suitability for operational monitoring
1	MQTT	TCP, pub/sub via broker	QoS 0, 1, 2	IoT, telemetry, sensors	*High* – guaranteed delivery (QoS 1, 2), low overhead, ideal for unreliable networks
2	CoAP	UDP, REST-like	Confirmable / Non-confirmable	Sensor networks, LLN	*Medium* – very lightweight, but operates over less reliable UDP
3	AMQP	TCP, broker/queues	Reliable delivery, persistence	Banking, enterprise systems	*Low* – excessive and "heavy" for resource-constrained IoT devices
4	WebSocket	TCP, full-duplex	TCP reliability	Chats, gaming, live data	*Low* – designed for continuous bidirectional communication, not energy-efficient for autonomous sensors
5	HTTP/REST	TCP/QUIC, request/response	TCP/QUIC reliability	Web APIs, mobile applications	*Medium* – widely used, but has high overhead (headers), inefficient for frequent small messages
6	DDS	UDP/TCP, pub/sub	Flexible QoS parameters	Avionics, robotics, industry	*Low* – very powerful, but complex to configure and excessive for the given task).

Source: developed by the authors.

As the analysis shows, the use of QoS levels 1 (“at least once”) or 2 (“exactly once”) in the MQTT protocol represents a decisive advantage. This guarantees data delivery even in the presence of temporary communication disruptions, minimizing information loss – a fundamental requirement for operational monitoring under unstable conditions.

3. *Data Processing and Storage Layer*. This layer constitutes the core of the platform, deployed either on cloud services (AWS, Azure, Google Cloud) or on a local server, and is responsible for receiving, processing, and reliably storing all data originating from the sensor network. Cloud infrastructure is prioritized, as it enables dynamic system scalability and ensures high fault tolerance.

The data flow at this level is organized as follows: the MQTT broker receives messages, forwards them to the Data Processing Module for validation and transformation, and subsequently, the processed data together with metadata are stored in the corresponding databases.

3.1. MQTT Broker. The central node for receiving and routing messages from all sensors. The broker acts as a buffer that offloads downstream components and ensures system scalability through asynchronous data processing and distribution.

3.2. Data Processing Module. Responsible for validating, decoding, and transforming raw data into a format suitable for analysis. At this stage, more advanced algorithms are implemented for:

– anomaly detection, using statistical methods (e.g., the three-sigma rule) or machine learning approaches (e.g., Isolation Forest, autoencoders for time series).

– monitoring exceedances of maximum permissible concentrations (MPCs), as defined by national and international standards [22].

In the context of limited historical data from de-occupied territories, the module employs a hybrid strategy that combines unsupervised learning with transfer learning from adjacent regions, as well as active online learning (expert-in-the-loop) to enable gradual model adaptation.

3.3. Data Storage System. To ensure both efficiency and reliability, a multi-model data storage architecture is adopted, combining:

– Time-Series Database (TSDB). For storing primary sensor measurements, specialized databases such as InfluxDB or TimescaleDB are optimal. These are designed for high write throughput, data compression, and fast time-based queries – capabilities that are critical for real-time monitoring.

– Relational Database (RDBMS). For storing contextual metadata (e.g., PostgreSQL). This includes sensor information (IDs, types, calibration data), geographic locations, regulatory thresholds, as well as user accounts and access rights.

4. *Application & Presentation Layer*. This layer provides end users with intuitive tools for interacting with the platform, visualizing data, and receiving alerts, which are critical for effective operational monitoring and informed decision-making.

To illustrate the main user interaction scenarios with the system, a Use Case Diagram is presented in Figure 2.

The diagram illustrates who interacts with the environmental monitoring system and in what way.

Ecologists and SES Operators observe the state of the environment by reviewing both real-time and historical data presented in the form of charts and tables. They receive automatic alert notifications whenever the monitored indicators exceed predefined thresholds and can generate analytical reports for a selected period based on the observed data.

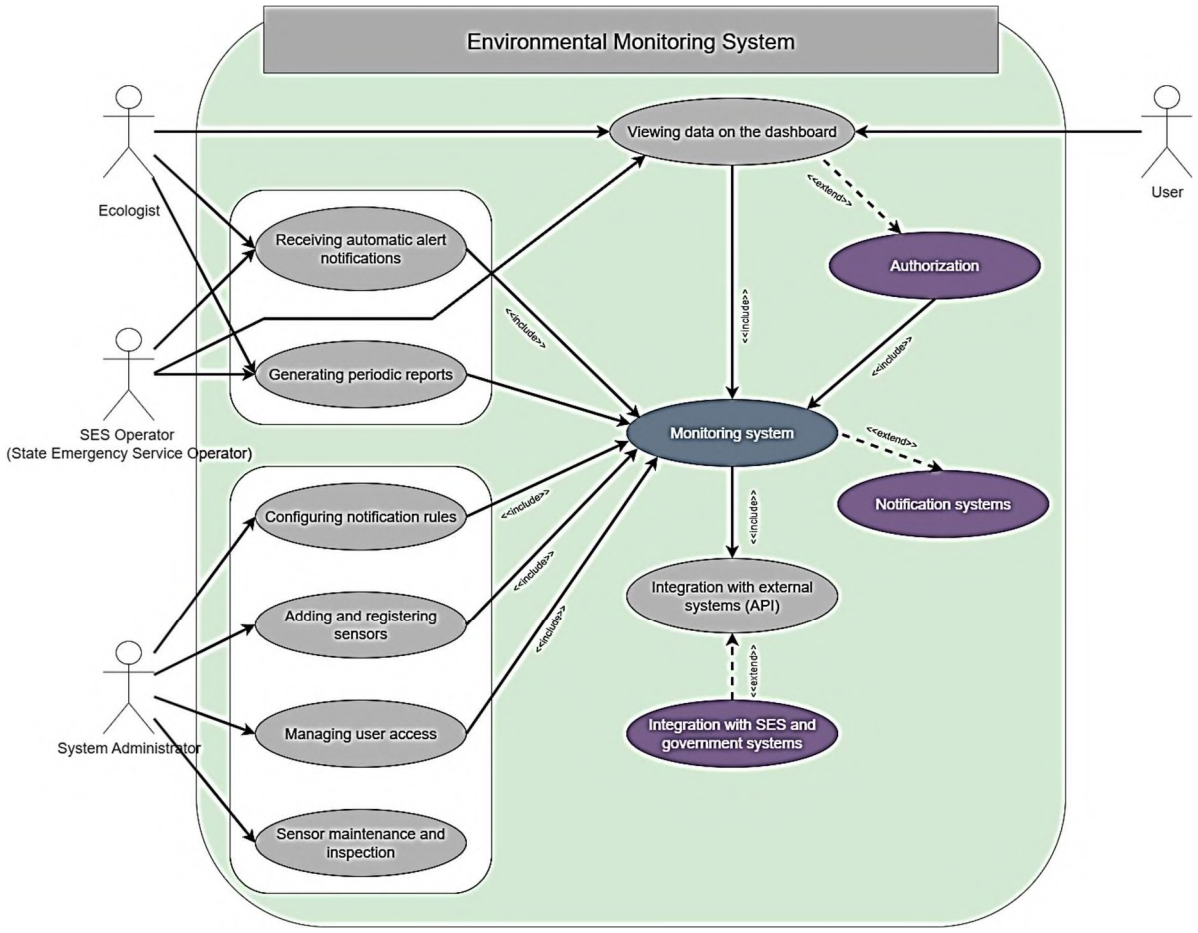


Fig. 2. Diagram of options for using the monitoring platform

The System Administrator is responsible for configuring and managing the system: adding new sensors and monitoring stations, defining notification rules (e.g., threshold values for pollutants), ensuring the proper functioning of all components including sensors, databases, and APIs, managing integrations with external systems, and setting up access control policies for all users.

Thus, the diagram distinguishes between two main user groups: information consumers (Ecologist, SES Operator, and general User) and the technical administrator, who ensures the system's overall operability.

At this level of representation, the system transforms raw data collected by sensors and processed at lower levels of the architecture into actionable insights – that is, clear visual information and timely alerts that enable informed, real-time decision-making to prevent potential crisis situations.

4.1. Access Interfaces (Web Dashboard and Mobile Applications). Two primary tools are provided for data interaction:

1. Interactive Web Dashboard, implemented using Grafana or custom solutions, which offers full functionality for real-time data visualization. It includes an interactive map with sensor locations, indicator trend charts, tabular data, and reporting capabilities. The ability to customize dashboards for different user categories (e.g., environmental specialists, emergency responders, decision-makers) enhances functionality and supports timely decision-making.

2. Mobile Applications (Android and iOS) provide rapid access to key data and alerts directly in the field. They enable responsible personnel to instantly assess the situation and remotely manage the monitoring system, which is critical during crisis situations.

4.2. Alerting Module. An automated notification system that delivers messages (via email, SMS, or messengers such as Telegram/Viber) to responsible stakeholders in case of crisis detection, MPC exceedances, or sensor malfunctions. The system supports flexible rule configuration, escalation mechanisms (notifying higher-level authorities in case of ignored alerts), and comprehensive event logging – making it the core of operational monitoring.

4.3. Integration and API (Application Programming Interface). The platform provides a standardized programmatic interface (RESTful API with JSON data format) to ensure interoperability and data exchange. This enables:

– integration with governmental information systems (e.g., State Emergency Service, Environmental Inspectorate, local authorities) to automate response processes;

– expansion of integration into related domains, such as production management at renewable energy facilities or energy consumption monitoring for comprehensive economic and environmental decision-making;

– utilization of data for scientific research and development.

The API architecture is designed in accordance with the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), which simplifies the use of platform data for further scientific studies and inter-agency collaboration. While governmental services today often rely on static file exchange [23], successful initiatives such as the alerts.in.ua service [24] demonstrate the societal demand for a unified national API for crisis monitoring. The proposed architecture is prepared for such integration.

To ensure that the theoretical advantages of the proposed architecture – particularly its fault tolerance and scalability – are validated in practice, a step-by-step verification process is required, taking into account key implementation aspects.

The validation strategy consists of three sequential stages:

1. Technical Feasibility (Proof-of-Concept). Development of a minimal laboratory prototype to confirm compatibility of key technologies (MQTT, InfluxDB, Grafana) and establish an end-to-end data pipeline.

2. Fault Tolerance Testing. Software-based simulation of internet disconnections to verify correct data buffering at the sensor node (Edge Computing) and guaranteed delivery upon reconnection.

3. Pilot Deployment. Long-term operation of 3-5 autonomous nodes in real field conditions to analyze system stability, measurement accuracy, and the effectiveness of autonomous power supply.

During platform implementation, particular attention must be given to the following critical aspects:

Autonomy and reliability of nodes. This fundamental requirement is achieved through the selection of low-power microcontrollers, use of sleep modes, and integration with solar panels. The duration of autonomous operation ($T_{autonomy}$) from a battery is calculated using the formula:

$$T_{autonomy}(days) = \frac{C_{batt} \cdot V_{nom} \cdot \eta_d}{E_{day}},$$

where C_{batt} – battery capacity (Ah);

V_{nom} – nominal voltage (V);

η_d – discharge efficiency factor (typically 0,85-0,95);

E_{day} – calculated daily energy consumption (Wh), which depends on the power and operating time in different modes:

$$E_{day} = (P_{sleep} \cdot t_{sleep}) + (P_{active} \cdot t_{active}) + (P_{tx} \cdot t_{tx})$$

where P – power consumption;

t – total time spent in sleep, active measurement, and data transmission modes.

Scalability and flexibility of the platform are ensured through the use of an event-driven architecture (EDA). The central element, the MQTT broker, allows new sensors (event producers) and

data processors (event consumers) to be added independently without modifying the logic of existing components. This creates loose coupling between system elements and enables flexible scaling of individual parts depending on the workload.

Cybersecurity is ensured at all levels: from encrypted data transmission (TLS/SSL) and secure device authentication to protection at the presentation layer. The web dashboard and APIs are developed in accordance with security standards, particularly the OWASP Top 10 [25], to mitigate common vulnerabilities. A role-based access control (RBAC) model is also implemented to differentiate user permissions.

When designing the architecture, the provisions of the CAP theorem (Consistency, Availability, Partition Tolerance) [26] were taken into account. In conditions of unstable connectivity in de-occupied territories, priority is given to availability and partition tolerance. This ensures that the system continues to collect and accept data even during temporary connection loss with some nodes. The architecture adheres to BASE principles (Basically Available, Soft state, Eventually consistent), guaranteeing eventual consistency: after communication is restored, all data accumulated on sensor nodes will be reliably delivered and processed, thereby maintaining monitoring integrity [27].

Economic justification. The project is feasible when the cost of prevented damage ($L_{prevented}$) significantly exceeds the total cost of ownership (C_{TCO}), which consists of capital expenditures (C_{CAPEX}) and operational (C_{OPEX}) expenditures:

$$C_{TCO} = C_{CAPEX} + C_{OPEX}.$$

For the long-term and reliable operation of the platform, its development should include:

– regulated technical maintenance. The development of clear instructions for calibration, cleaning, and component replacement;

– institutional support. Transfer of the system to the balance sheet of a responsible authority (e.g., the State Environmental Inspectorate);

– software update planning. Regular release of updates to improve functionality and strengthen security.

Conclusions. The study developed and substantiated a conceptual architecture of a software platform for rapid monitoring of water resources, adapted to the specific challenges of de-occupied territories.

The scientific novelty lies in the proposed detailed four-layer architecture (sensing, networking, processing, presentation), which systematically addresses the key challenge – ensuring fault tolerance, deployment flexibility, and interoperability under conditions of damaged infrastructure and unstable connectivity. Unlike existing analogues designed for stable environments, the proposed solution comprehensively integrates technologies for operation in crisis scenarios.

Practical results include justification of key technology choices for each architectural layer. For the sensing layer, a modular approach with specialized sensors is proposed, ensuring "graceful degradation" of the system. For the networking layer, the use of the MQTT protocol with QoS is substantiated to guarantee data delivery, along with hybrid communication technologies (LPWAN/4G). For the server layer, a fault-tolerant architecture is proposed based on an MQTT broker, a machine learning module, and a multi-model data repository.

The key advantage of the developed solution is its comprehensive orientation toward fault tolerance, rapid deployment, and integration with emergency response systems. Implementation of such a platform will enable a shift from reactive to proactive, data-driven environmental safety management, ensuring informed decision-making in real time.

Further research will focus on prototyping key system modules, practical validation of fault tolerance by simulating connectivity disruptions, and the development of predictive analytics algorithms for early detection of potential environmental threats.

Thus, the proposed platform is not only a technical solution but also a strategic tool that ensures the environmental dimension of safe and sustainable recovery of Ukraine's de-occupied territories.

Statement on the Use of Generative AI in the Manuscript Preparation Process.

The authors utilized AI (Chat GPT) to enhance the readability and correct stylistic and grammatical errors in this article. Following the use of this tool, the authors reviewed and edited the content as needed, and assume full responsibility for the publication's content.

References

1. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (n.d.). *Zlochyny viiny proty dovkillia: pytannia ne lyshe Ukrainy, a y usoho svitu* [War crimes against the environment: an issue not only for Ukraine, but for the whole world]. Retrieved August 19, 2025, from https://mepr.gov.ua/zlochyny-vijny-proty-dovkillya-pytannya-ne-lyshe-ukrayiny-a-j-usogo-svitu/ (in Ukrainian).

2. Velyka, A. (2024). *Repeated organic pollution is recorded on the Seim River*. EcoPolitic. https://ecopolitic.com.ua/en/news/repeated-organic-pollution-is-recorded-on-the-seim-river/.

3. Boholiubov, V. M., Salnikova, A. V., & Rakoid, O. O. (2023). *Ekolohichnyi monitorynh: navchalnyi posibnyk* [Environmental monitoring: a study guide]. Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u243/24.pdf (in Ukrainian).

4. Lindemulder, G., & Kosinski, M. (2025). *What is environmental monitoring?* IBM. https://www.ibm.com/think/topics/environmental-monitoring.

5. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. (2025). *Pershyi pilotnyi proiekt u ramkakh e-Voda zapustyly na Zakarpatti* [The first pilot project within the e-Water framework was launched in Zakarpattia]. https://mepr.gov.ua/pershyi-pilotnyj-proyekt-u-ramkah-e-voda-zapustyly-na-zakarpatti/ (in Ukrainian).

6. ArcGIS Hub. (n.d.). *Chernihiv water arteries monitor: Online monitoring system of the state of water arteries of the Chernihiv region*. Retrieved August 19, 2025, from https://water-monitoring-wdc-ukraine.hub.arcgis.com/.

7. University of Central Florida. (n.d.). *Real-time water quality monitoring*. Stormwater Management Academy. Retrieved August 19, 2025, from https://stormwater.ucf.edu/research/water-quality-monitoring/.

8. Axiotidis, C., Konstantopoulou, E., & Sklavos, N. (2024). A wireless sensor network IoT platform for consumption and quality monitoring of drinking water. *SN Applied Sciences*. https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-06384-1.

9. Chen, W., Hao, X., Lu, J., Yan, K., Liu, J., He, C., & Xu, X. (2021). Research and design of distributed IoT water environment monitoring system based on LoRa. *Journal of Sensors*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/9403963.

10. Nasution, S. F., Harmadi, H., Suryadi, S., & Widiyatmoko, B. (2023). Development of river flow and water quality using IOT-based smart buoys environment monitoring system. *Jurnal Ilmu Fisika | Universitas Andalas*, *16*(1), 1-12. https://doi.org/10.25077/jif.16.1.1-12.2024.

11. Ghosh, D., Prakash, N., Goyal, P., & Agrawal, A. (2020). *Smart saline level monitoring system using ESP32 and MQTT-S*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/341778266_Smart_Saline_Level_Monitoring_System_Using_ESP32_And_MQTT-S.

12. Ashraf, U., Khwaja, A., Qadir, J., Avallone, S., & Yuen, C. (2021). *WiMesh: Leveraging mesh networking for disaster communication in poor regions of the world*. arXiv. https://arxiv.org/abs/ 2101.00573.

13. Poke, B. (2023). *Evaluation of LoRa mesh networks for disaster response*. Deep Blue Documents, University of Michigan. https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/176695.

14. Attallah, N. A., Horsburgh, J. S., Beckwith, A. S., & Tracy, R. J. (2021). Residential water meters as edge computing nodes: Disaggregating end uses and creating actionable information at the edge. *Sensors*, *21*(16), 5310. https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5310.

15. Pires, L. M., & Gomes, J. (2024). River water quality monitoring using LoRa-based IoT. *Applied System Innovation*, *8*(6), 127. https://www.mdpi.com/2411-9660/8/6/127.

16. Pacella, M., Papa, A., Papadia, G., & Fedeli, E. (2025). A scalable framework for sensor data ingestion and real-time processing in cloud manufacturing. *Applied Sciences*, *18*(1), 22. https://www.mdpi.com/1999-4893/18/1/22.

17. Liu, R., Yuan, J., & Huang, X. (2024). *Benchmarking time series databases with IoTDB-Benchmark for IoT scenarios*. arXiv. https://arxiv.org/abs/1901.08304.

18. EMQ Technologies. (2023, November 8). *Building an IoT time-series data application for energy storage with MQTT and InfluxDB*. Medium. https://emqx.medium.com/building-an-iot-time-series-data-application-for-energy-storage-with-mqtt-and-influxdb-9094aff810f5.

19. Khattach, O., Moussaoui, O., & Hassine, M. (2025). *End-to-end architecture for real-time IoT analytics and predictive maintenance using stream processing and ML pipelines*. ResearchGate.

20. Shahid, M. S. B., Rifat, H. R., Uddin, M. A., Islam, M. R., & Rahaman, M. A. (2024). Hyper-tuning-based ensemble machine learning approach for real-time water quality monitoring and prediction. *Applied Sciences*, *14*(19), 8622. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/19/8622.

21. Al-Khafaji, M., Al-Fahaad, K., & Angelidaki, I. (2022). Conflict-related environmental damages on health: lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Environmental Health and Preventive Medicine*, *27*, 37. https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122.

22. Ministerstvo okhorony zdorov'ia Ukrainy. (2010, May 12). *Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihiienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoiu"* [On approval of the State sanitary norms and rules "Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption"] (Nakaz № 400). Verkhovna Rada Ukrainy. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10 (in Ukrainian).

23. Kabinet Ministriv Ukrainy. (2015, October 21). *Pro zatverdzhennia Polozhennia pro nabory danykh, yaki pidliahaiut opryliudnenniu u formi vidkrytykh danykh* [On the Approval of the Regulation on data sets subject to publication in the form of open data] (Postanova № 835). Verkhovna Rada Ukrainy. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-%D0%BF (in Ukrainian).

24. Alerts.in.ua. (n.d.). *Alerts.in.ua API*. Retrieved August 19, 2025, from https://devs.alerts.in.ua/.

25. OWASP Foundation. (2021). *OWASP Top 10*. https://owasp.org/www-project-top-ten/.

26. Gilbert, S., & Lynch, N. (2002). Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services. *ACM SIGACT News*, *33*(2), 51-59. https://doi.org/10.1145/564585.564601.

27. Brewer, E. A. (2012). CAP twelve years later: How the 'rules' have changed. *Computer*, *45*(2), 23-29. https://doi.org/10.1109/MC.2012.37.

Список використаних джерел

1. *Злочини війни проти довкілля: Питання не лише України, а й усього світу – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. (б. д.). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт. https://mepr.gov.ua/zlochyny-vijny-proty-dovkillya-pytannya-ne-lyshe-ukrayiny-a-j-usogo-svitu/.

2. Velyka, A. (2024). *Repeated organic pollution is recorded on the Seim River*. EcoPolitic. https://ecopolitic.com.ua/en/news/repeated-organic-pollution-is-recorded-on-the-seim-river/.

3. Боголюбов, В. М., Сальнікова, А. В., & Ракоїд, О. О. (2023). *Екологічний моніторинг: навчальний посібник*. Національний університет біоресурсів і природокористування України. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u243/24.pdf.

4. Lindemulder, G., & Kosinski, M. (n.d.). *What is environmental monitoring?* IBM. https://www.ibm.com/think/topics/environmental-monitoring.

5. *Перший пілотний проєкт у рамках е-Вода запустили на Закарпатті – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. (n.d.). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт. https://mepr.gov.ua/pershyj-pilotnyj-proyekt-u-ramkah-e-voda-zapustyly-na-zakarpatti.

6. *Systems of online monitoring of the state of water arteries of the Chernihiv region*. (n.d.). Systems of online monitoring of the state of water arteries of the Chernihiv region. https://water-monitoring-wdc-ukraine.hub.arcgis.com/.

7. University of Central Florida. (n.d.). *Real-time water quality monitoring*. Stormwater Management Academy. https://stormwater.ucf.edu/research/water-quality-monitoring/.

8. Axiotidis, C., Konstantopoulou, E., & Sklavos, N. (2024). A wireless sensor network IoT platform for consumption and quality monitoring of drinking water. *Discover Applied Sciences*, *7*(1). https://doi.org/10.1007/s42452-024-06384-1.

9. Chen, W., Hao, X., Lu, J., Yan, K., Liu, J., He, C., & Xu, X. (2021). Research and design of distributed iot water environment monitoring system based on lora. *Wireless Communications and Mobile Computing*, *2021*, 1-13. https://doi.org/10.1155/2021/9403963.

10. Nasution, S. F., Harmadi, H., Suryadi, S., & Widiyatmoko, B. (2023). Development of river flow and water quality using iot-based smart buoys environment monitoring system. *Jurnal ilmu fisika | universitas andalas*, *16*(1), 1-12. https://doi.org/10.25077/jif.16.1.1-12.2024.

11. Ghosh, Debjani & Agrawal, Ankit & Prakash, Navin & Goyal, Pushkal. (2020). Smart Saline Level Monitoring System Using ESP32 And MQTT-S.

12. Ashraf, U., Khwaja, A., Qadir, J., Avallone, S., & Yuen, C. (2021). *WiMesh: Leveraging mesh networking for disaster communication in poor regions of the world*. arXiv. https://arxiv.org/abs/2101.00573.

13. Poke, B. (2023). *Evaluation of LoRa mesh networks for disaster response.* Deep Blue Documents, University of Michigan. https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/176695.

14. Attallah, N. A., Horsburgh, J. S., Beckwith, A. S., & Tracy, R. J. (2021). Residential water meters as edge computing nodes: Disaggregating end uses and creating actionable information at the edge. *Sensors*, *21*(16), 5310. https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5310.

15. Pires, L. M., & Gomes, J. (2024). River water quality monitoring using LoRa-based IoT. *Applied System Innovation*, *8*(6), 127. https://www.mdpi.com/2411-9660/8/6/127.

16. Pacella, M., Papa, A., Papadia, G., & Fedeli, E. (2025). A scalable framework for sensor data ingestion and real-time processing in cloud manufacturing. *Applied Sciences*, *18*(1), 22. https://www.mdpi.com/1999-4893/18/1/22.

17. Liu, R., Yuan, J., & Huang, X. (2024). *Benchmarking time series databases with IoTDB-Benchmark for IoT scenarios*. arXiv. https://arxiv.org/abs/1901.08304.

18. EMQ Technologies. (2023, November 8). *Building an IoT time-series data application for energy storage with MQTT and InfluxDB*. Medium. https://emqx.medium.com/building-an-iot-time-series-data-application-for-energy-storage-with-mqtt-and-influxdb-9094aff810f5.

19. Khattach, O., Moussaoui, O., & Hassine, M. (2025). *End-to-end architecture for real-time IoT analytics and predictive maintenance using stream processing and ML pipelines*. ResearchGate.

20. Shahid, M. S. B., Rifat, H. R., Uddin, M. A., Islam, M. R., & Rahaman, M. A. (2024). Hyper-tuning-based ensemble machine learning approach for real-time water quality monitoring and prediction. *Applied Sciences*, *14*(19), 8622. https://www.mdpi.com/2076-3417/14/19/8622.

21. Al-Khafaji, M., Al-Fahaad, K., & Angelidaki, I. (2022). Conflict-related environmental damages on health: lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Environmental Health and Preventive Medicine*, *27*, 37. https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122.

22. Про затвердження Змін до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», Наказ Міністерства охорони здоров'я України No. 505 (2011) (Україна). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1043-11#Text.

23. Про затвердження Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних, Постанова Кабінету Міністрів України №. 835 (2025) (Україна). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/835-2015-п#Text.

24. Alerts.in.ua. (n.d.). *Alerts.in.ua API*. Retrieved August 19, 2025, from https://devs.alerts.in.ua/.

25. OWASP Foundation. (2021). *OWASP Top 10*. https://owasp.org/www-project-top-ten/.

26. Gilbert, S., & Lynch, N. (2002). Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services. *ACM SIGACT News*, *33*(2), 51-59. https://doi.org/10.1145/564585.564601.

27. Brewer, E. A. (2012). CAP twelve years later: How the 'rules' have changed. *Computer*, *45*(2), 23-29. https://doi.org/10.1109/MC.2012.37.

Отримано 19.09.2025

УДК 004.9:[504.4.054+355.015]

Фенікс Сергійович Аартворк[1], Олена Василівна Трунова[2]

[1]аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: nicksnickslaw@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-1129-1322

[2]кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: m.dorosh@stu.cn.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0689-8846
ResearcherID: G-3925-2014. **Scopus Author ID:** 57211429427

ПРОЄКТУВАННЯ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ОПЕРАТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ НА ОСНОВІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

Актуальність дослідження зумовлена критичним пошкодженням інфраструктури водопостачання на деокупованих територіях України, що створює гострі ризики техногенного забруднення водних ресурсів та виявляє неефективність традиційних методів моніторингу.

Проблема полягає у відсутності комплексної програмної платформи, здатної забезпечити оперативний та надійний збір, передачу й аналіз даних в умовах нестабільного зв'язку, швидкого розгортання та необхідності інтеграції із системами кризового реагування.

Метою статті є розробка та обґрунтування концептуальної архітектури спеціалізованої програмної платформи на основі Інтернету речей (IoT), адаптованої до цих викликів.

У процесі дослідження запропоновано деталізовану чотирирівневу архітектуру, що включає: рівень датчиків із модульним принципом для моніторингу специфічних загроз (важкі метали, нафтопродукти); мережевий рівень з використанням гібридного підходу (LPWAN/4G) та протоколу MQTT для гарантованої доставки даних; рівень обробки та зберігання на базі хмарних сервісів, MQTT-брокера, модуля машинного навчання та мультимодельного сховища даних; рівень представлення та взаємодії, що об'єднує вебпанель, мобільні додатки, систему сповіщень та API для інтеграції.

Висновки полягають у тому, що запропонована архітектура створює основу для розробки відмовостійкої та масштабованої платформи, яка дозволить перейти від реактивного до проактивного управління екологічною безпекою, забезпечуючи прийняття обґрунтованих рішень у реальному часі та сприяючи сталому відновленню постраждалих територій.

Ключові слова: *інтернет речей (IoT); оперативний моніторинг; водні ресурси; деокуповані території; екологічна безпека; архітектура програмної платформи; відмовостійкість; автономні сенсори.*

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 27.

Aartvork, P. S., Trunova, O. V. (2025). Designing a software platform for operational monitoring of water resources based on the internet of things. *Technical sciences and technologies,* (3(41)), 296-309. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-296-309.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-310-321
УДК 656.1:796.6:519.866

Олена Володимирівна Кучковська[1], Олександра Юріївна Лисецька[2], Леся Ігорівна Фундак[3]

[1]студентка кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів
Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: olena.ky92@ukr.net

[2]доктор філософії з математики, доцент кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів
Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: oleksandra.lysetska@lnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0000-0730-7222
ResearcherID: OEO-3467-2025

[3]асистент кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів
Львівський національний університет імені Івана Франка (Львів, Україна)
E-mail: lesya.fundak@lnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5091-6971

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІДОКРЕМЛЕНИХ ВЕЛОДОРІЖОК: КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ЧАСОВИХ РЯДІВ ТА ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВОГО АНАЛІЗУ НА ПРИКЛАДІ БРУКЛІНСЬКОГО МОСТА

У статті досліджено вплив реконструкції Бруклінського мосту в Нью-Йорку у вересні 2021 року, коли було впроваджено відокремлену велосипедну доріжку, на динаміку велосипедного трафіку на цій ділянці велосипедної інфраструктури. Для оцінки ефекту застосовано комбінацію прогнозних та каузальних методів: модель SARIMA для аналізу часових рядів та метод різниць у різницях (Difference-in-Differences, DiD) із використанням Мангеттенського мосту як контрольної групи. SARIMA-модель продемонструвала високу точність у доінтервенційний період (MAPE ≈ 25,5 %, RMSE ≈ 10,4 тис.), проте після реконструкції її прогнозна здатність суттєво погіршилася (MAPE ≈ 51 %, RMSE ≈ 55 тис.), що вказує на наявність структурного зсуву в даних. Додатковий аналіз за допомогою тестів CUSUM/CUSUMSQ підтвердив систематичне недооцінювання фактичного велотрафіку, починаючи з середини 2022 року.

Каузальний аналіз показав статистично значущий позитивний ефект: оцінка DiD становила близько 26,7 тис. додаткових велосипедних поїздок на місяць ($p < 0.001$), що відповідає відносному приросту на 48,4 % порівняно з базовим рівнем. Тести на робастність підтвердили стабільність результату при зміні дати інтервенції, виключенні пандемійного періоду та врахуванні сезонних ефектів.

Отримані результати свідчать про значний практичний ефект розвитку велосипедної інфраструктури, підтверджуючи її роль як чинника сталого міського транспорту. Застосоване поєднання SARIMA та DiD дозволяє комплексно оцінювати вплив інфраструктурних рішень, враховуючи як прогнозні можливості, так і причинно-наслідкові ефекти. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на використання ARIMAX чи синтетичного контролю для врахування зовнішніх факторів. Досвід реконструкції Бруклінського мосту може бути адаптований до українських реалій, зокрема під час планування реконструкції мосту Патона в Києві.

Ключові слова: *велосипедна інфраструктура; часовий ряд; SARIMA; Difference-in-Differences; CUSUM/CUSUMSQ; прогнозування; робастність.*

Рис.: 7. Табл.: 3. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. З невпинним зростанням урбанізації мегаполіси дедалі частіше стикаються з низкою транспортних викликів, серед яких зростання автомобільного трафіку, забруднення повітря та зниження безпеки на дорогах. Одним з ефективних рішень є розвиток велосипедної інфраструктури, зокрема облаштування відокремлених велодоріжок. Аналіз впливу подібних інфраструктурних рішень є важливим не лише для оцінки ефективності конкретних проєктів, а і для формування міської транспортної політики у великих містах. Важливим аспектом є також вплив велосипедної інфраструктури на транспортні потоки загалом. Так, у [1] зазначено, що системні інвестиції у велоінфраструктуру можуть змінювати структуру транспортних потоків мегаполісів, зменшуючи залежність від автомобілів. Аналіз окремих і водночас масштабних випадків, як от Бруклінського мосту в Нью-Йорку, дозволяє виявити закономірності, які можуть бути застосовані й до інших великих міських агломерацій. Зокрема, в Україні це може бути впроваджено, наприклад, при плануванні реконструкції моста Патона в Києві.

Таким чином, актуальність дослідження зумовлена необхідністю обґрунтованої оцінки впливу реконструкції велоінфраструктури на динаміку велосипедного руху, а також потенціалом поширення отриманого досвіду на інші транспортні об’єкти мегаполісів.

© О. В. Кучковська, О. Ю. Лисецька, Л. І. Фундак, 2025

Водночас тема є важливою і для галузей інформаційних технологій та системного аналізу, оскільки вивчення транспортних потоків ґрунтується на використанні сучасних методів збору даних, математичного моделювання та прогнозування, що дозволяє формувати науково обґрунтовані рішення для міської мобільності.

Постановка проблеми. Бруклінський міст, що знаходиться в місті Нью-Йорк (США), до 2021 року мав велосипедну доріжку поруч із пішохідною, проте кількість велосипедистів, які користувалися нею, невпинно зменшувалася. Це було пов'язано з великою кількістю пішоходів та можливою небезпекою руху поряд з автомобільним транспортом. У вересні 2021 року місто Нью-Йорк зробило стратегічний крок у розвитку велосипедної інфраструктури, ввівши в експлуатацію відокремлену велосипедну доріжку на Бруклінському мосту.

Проблема дослідження полягає у відсутності аналізу ефективності цього рішення та його впливу на поведінку велосипедистів і загальну динаміку транспортного потоку. Для її вирішення доцільним є застосування сучасних методів інформаційних технологій, зокрема прогнозування часових рядів. Отримані результати мають практичне значення для формування науково обґрунтованих рекомендацій у сфері розвитку міської транспортної інфраструктури та можуть бути використані для ухвалення управлінських рішень у мегаполісах, включно з українськими містами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження показують, що відокремлені велодоріжки суттєво впливають на мобільність населення, сприяючи зростанню кількості велосипедних поїздок. Зокрема, у праці [2] продемонстровано, що наявність якісної велосипедної інфраструктури прямо корелює зі зростанням частки велосипедистів у міському транспортному потоці. Подібні результати підтверджені й у дослідженні [3], де автори зауважують, що розвиток велосипедної інфраструктури позитивно позначається на мобільності мешканців та рівні громадського здоров'я.

Огляд попередніх досліджень також показує, що методи квазіекспериментального аналізу, зокрема й DiD, активно застосовуються для оцінки впливу велосипедної інфраструктури на транспортні та безпекові показники. Так, у [4] авторами було розроблено протокол природного експерименту для трьох канадських міст із використанням DiD для вимірювання змін у велосипедному трафіку та здоров'ї населення. Ф. Шраус у [5] дослідив причинно-наслідковий вплив велосипедної інфраструктури на трафік і підтвердив ефективність підходу DiD у поєднанні з просторовими контролями. Крім того, низка емпіричних досліджень у США та Європі показали, що розширення велосипедної мережі сприяє зростанню попиту на системи оренди велосипедів, що підтверджує релевантність цього методу для вивчення міських інтервенцій у транспортній сфері.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри помітний прогрес у використанні моделей часових рядів, зокрема SARIMA, для прогнозування велосипедного трафіку більшість існуючих досліджень зосереджується на довгострокових тенденціях та впливі метеорологічних факторів. Натомість питання комплексної оцінки локальних інфраструктурних змін, які відбуваються на окремих ділянках доріг, залишаються менш дослідженими. Зокрема, є обмежена кількість робіт, що аналізують ефективність реконструкції чи переоблаштування окремих транспортних артерій із використанням методів Difference-in-Differences (DiD) [4; 5]. Це створює дослідницьку нішу для поєднання прогнозних можливостей моделей часових рядів та казуальних підходів, спрямованих на аналіз конкретних урбаністичних інтервенцій.

Можна зауважити, що згадані роботи [4; 5] зосереджувалися переважно на оцінці безпеки або загального зростання поїздок, тоді як структурні зміни в часових рядах велосипедного трафіку після інфраструктурних інтервенцій розглянуті недостатньо. Поєднання прогностичної моделі на основі часових рядів (SARIMA) із причинно-наслідковими підходами (DiD) не було розглянуто комплексно в жодній із згаданих статей. А

використання саме такої комбінації дозволяє одночасно оцінити як динаміку, так і ефект інтервенції. У цьому контексті ця стаття робить внесок, комбінуючи класичні моделі часових рядів і сучасні квазіекспериментальні методи для глибшого розуміння ефектів реконструкції велоінфраструктури.

Метою статті є оцінка впливу введення відокремленої велодоріжки на Бруклінському мосту на інтенсивність велотрафіку та розвиток міської велосипедної транспортної системи з використанням методів часових рядів і каузального аналізу Difference-in-Differences (DiD).

Виклад основного матеріалу. Термінологія та понятійний апарат, використані у статті, повністю відповідають і узгоджуються з термінологією, викладеною у класичних підручниках та навчальних посібниках з аналізу часових рядів, SARIMA та методики Difference-in-Differences (DiD) [6-9].

Аналіз даних проводився за допомогою мови програмування Python і є доступним для перегляду у репозиторії [10]. Для проведення аналізу було використано відкриті дані (див. [10; 11]) про перетини велосипедистами Бруклінського та Мангеттенського мостів за період із грудня 2013 року по грудень 2024 року за кожен місяць. Як видно з рис. 1, як у випадку Бруклінського моста, так і у випадку Мангеттенського, спостерігається чітка сезонність, що свідчить про те, що ці два часові ряди не є стаціонарними. Для застосування моделі SARIMA необхідно спочатку підібрати її параметри d, D, q, Q. Для визначення цих параметрів було проведено автокореляційний (ACF) та частковий автокореляційний (PACF) аналізи часового ряду. Продиференціювавши часовий ряд один раз ($d = 1$) було забезпечено стаціонарність, що підтверджується тестом Дікі-Фуллера ($p = 0.007 < 0{,}05$). Оскільки спостерігається сезонна компонента з періодом 12 місяців, було застосовано сезонне диференціювання порядку $D = 1$ з лагом $s = 12$.

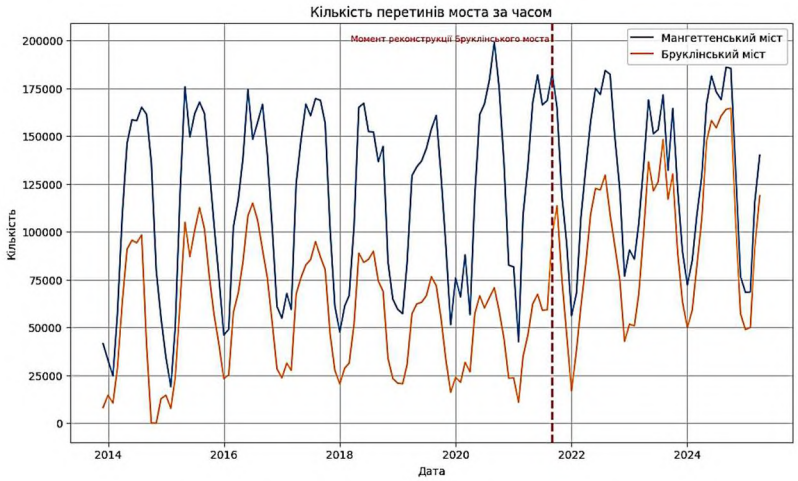


Рис. 1. Кількість щомісячних перетинів Бруклінського та Мангеттенського мостів за досліджуваний період

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 зображено графіки ACF та PACF для продиференційованого ряду. На графіку звичайної частини PACF видно значущі піки на перших двох лагах, що свідчить про доцільність включення не сезонної MA-компоненти порядку $q = 2$. Також PACF показує значущий пік на першому лагу, тому до моделі додано AR-компоненту порядку $p = 1$. Сезонні піки на лагах, кратних 12, спостерігаються як на ACF, так і на PACF, що обґрунтовує використання сезонної AR-компоненти порядку $P = 1$ та сезонної MA-компоненти порядку $Q = 1$. Таким чином, оптимальною виявилася модель виду SARIMA$(1,1,2)(1,1,1)_{12}$, яка адекватно відображає як трендові, так і сезонні коливання у велосипедному трафіку Бруклінського моста.

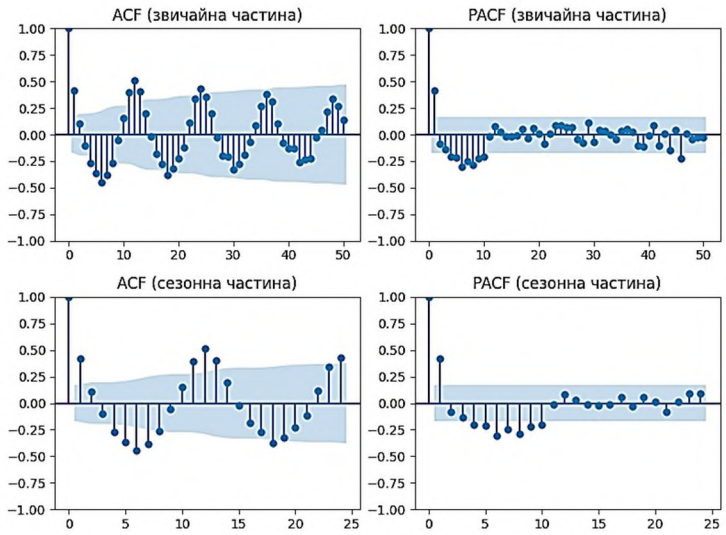


Рис. 2. Графіки автокореляції (ACF) та часткової автокореляції (PACF)
Джерело: розроблено авторами.

Зауважимо, що з метою верифікації адекватності обраної моделі було проведено її порівняння з іншими наборами специфікацій SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)$_{12}$. Так, було виявлено, що інформаційний критерій Акайке (AIC) й інформаційний критерій Байєса (BIC) досягають найнижчих значень для моделі SARIMA(1,2,1)(1,1,2)$_{12}$ (AIC=188,14, BIC=199,73) проти (AIC=864,49, BIC= 879,23) для SARIMA(1,1,2)(1,1,1)$_{12}$. Формально така поведінка свідчить про кращу якість моделі SARIMA(1,2,1)(1,1,2)$_{12}$, але було прийнято рішення для аналізу зупинитись на моделі SARIMA(1,1,2)(1,1,1)$_{12}$ з метою кращого відображення сезонної компоненти та забезпечення стабільніших результатів на післяінтервенційному періоді, адже саме ці фактори є критичними для контексту транспортного прогнозування.

Візуалізація декомпозиції часового ряду (рис. 3) дозволяє розібрати ряд на компоненти – тренд, сезонність та відхилення – і допомагає зрозуміти його властивості.

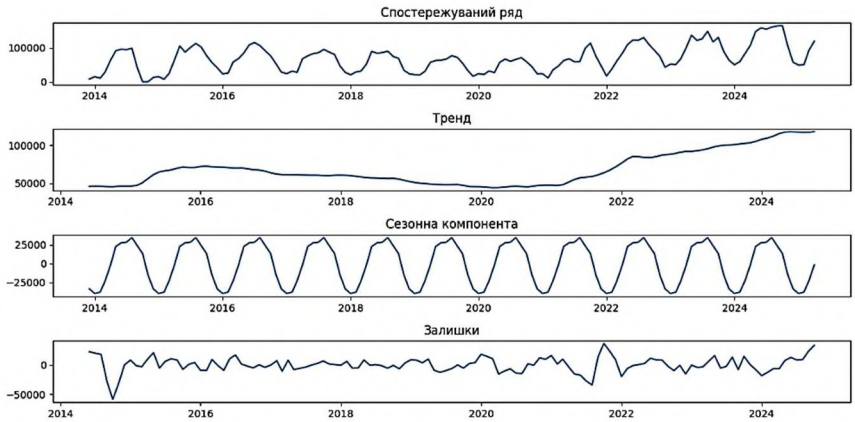


Рис. 3. Графіки декомпозиції часового ряду
Джерело: розроблено авторами.

Графік спостережуваного ряду зображує кількість велосипедистів, що перетнули міст за кожен місяць. З візуалізації графіка тренду можна помітити, що з 2016 року до 2021 спостерігається загальне зниження тренду, що вказує на спад у перетинах мосту протягом цього періоду. Проте після 2021 року спостерігається початок зростання тренду, що може свідчити про позитивну динаміку розвитку перетину мосту. На графіку сезонності можна побачити циклічні зміни в даних, які пов’язані із сезонними факторами. Наприклад, видно

регулярні зміни в перетинах мосту, що пов'язані з порою року. Останній із графіків відображає залишкові компоненти, що залишаються після видалення тренду та сезонності з оригінальних даних. Сильний стрибок у вересні 2021 року може свідчити про виняткову подію або важливий фактор, що вплинув на перетин мосту в цей період.

Отже, ця візуалізація допомагає розібрати часовий ряд на різні складові та виявити в них певні закономірності, що є потрібним для аналізу та прогнозування динаміки перетинів Бруклінського мосту.

Побудова прогнозної моделі, її оцінка та аналіз. Для перевірки правильного прогнозування було обрано проміжок від грудня 2013 до грудня 2019 року, який виступає як тренувальні дані, модель SARIMA навчалася на історичних даних, тобто даних, які були зібрані протягом цього періоду. Після навчання модель використовується для прогнозування значень часового ряду на майбутній період, у такому випадку – на цілий 2020 рік та січень-червень 2021 року. Такий період був вибраний з метою перевірки точності моделі на даних, які передували моменту реконструкції (вересень 2021).

На рис. 4 зображено графік прогнозованих і фактичних значень, де можна помітити, що прогнозовані дані та реальні дані досить близькі одне до одного на більшій частині проміжку. Це свідчить про те, що модель SARIMA виявилася досить ефективною у прогнозуванні значень часового ряду на майбутній період, особливо на основі даних, які були використані для її навчання. Такий близький збіг між прогнозованими та фактичними значеннями свідчить про те, що модель може бути корисною для передбачення майбутніх тенденцій та динаміки часового ряду.

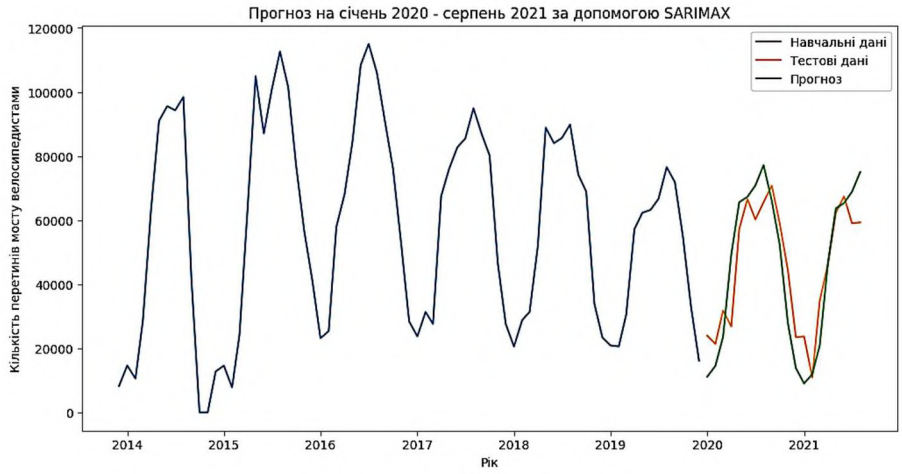


Рис. 4. Прогнозування динаміки велотрафіку на Бруклінському мосту за допомогою моделі SARIMA: навчальні та тестові дані в порівнянні з прогнозом

Джерело: розроблено авторами.

Отримані показники точності (MAPE ≈ 25,5 %) свідчать про достатню здатність моделі відтворювати динаміку велосипедного трафіку. У випадку задач міського транспортного прогнозування, де значний вплив мають зовнішні чинники (погодні умови, пандемія COVID-19, зміни інфраструктури), така похибка є очікуваною і допустимою. Отримане значення середньоквадратичної похибки RMSE (≈10,4 тис. перетинів) відображає масштаб розбіжності в кількостях перетинів, але попри це модель коректно відображає загальний тренд та сезонні коливання, що підтверджує її застосовність для практичних прогнозів. Загалом модель адекватно відтворює трендові та сезонні компоненти, проте спостерігається незначне хибне оцінювання пікових значень, що властиво для моделей класу SARIMA у випадках із вираженою сезонністю та різкими стрибками.

Прогнозна модель SARIMA дає можливість розуміти тенденції та передбачати динаміку часового ряду на підставі минулих даних [12]. Для оцінки впливу реконструкції модель SARIMA навчалася виключно на доінтервенційних даних (грудень 2013 – червень 2021), після чого виконано зовнішнє прогнозування до грудня 2024 року. На рис. 5 зображено ситуацію з перетинами мосту у період з грудня 2013 року до грудня 2024 року, ми бачимо, що прогнозовані значення часового ряду, починаючи з вересня 2021 року, суттєво нижчі за фактичні дані. Це свідчить про те, що прогнозована модель недооцінила реальну кількість перетинів мосту в той період часу, що підтверджується і отриманими показниками точності: MAPE ≈ 51 %, RMSE ≈ 54 984,5 перетину.

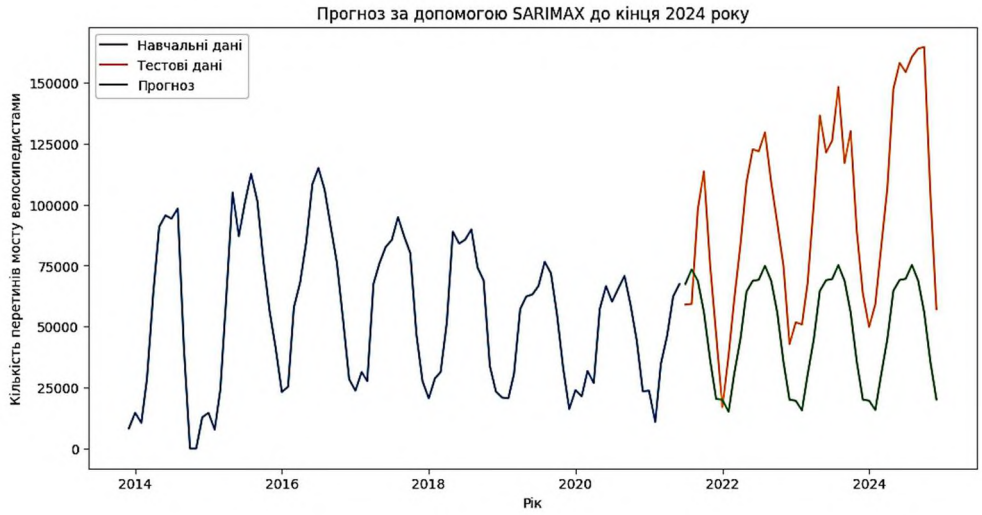


Рис. 5. Прогноз динаміки велотрафіку на Бруклінському мосту за допомогою моделі SARIMA до кінця 2024 року

Джерело: розроблено авторами.

Порівняння моделі із бенчмарками. Додатково для оцінки впливу структурного зсуву в даних, що був викликаний реконструкцією Бруклінського мосту у вересні 2021 року, період прогнозування було поділено на короткостроковий горизонт тривалістю 12 місяців (вересень 2021 – серпень 2022) та повний післяінтервенційний період (вересень 2021 – грудень 2024). Такий поділ дозволяє порівняти точність прогнозів SARIMA до та після потенційних змін у структурі даних, щоб виявити, чи погіршення точності пов’язане з неврахуванням зсуву. Очікується, що реконструкція мосту могла спричинити стійке зростання велотрафіку, що не було враховано моделлю SARIMA, навченої на даних до червня 2021 року, тоді як бенчмаркові моделі (сезонне наївне та ETS) можуть виявитися стійкішими до таких змін завдяки їхній простоті або адаптивності [12].

Сезонне наївне прогнозування виступає базовим методом, який повторює останнє спостереження для кожного сезонного періоду, забезпечуючи просту перевірку стійкості сезонних закономірностей без урахування трендів чи автокореляції. На практиці цей метод передбачає взяття останнього значення для кожного місяця з тренувальних даних і використання його для прогнозування відповідних місяців у майбутньому, що робить його ефективним для оцінки складніших моделей. Натомість модель ETS уже враховує компоненти помилки, тренду та сезонності через експоненційне зважування попередніх спостережень, що робить її більш гнучкою порівняно з наївним методом [13]. ETS працює шляхом оцінки параметрів згладжування (альфа для рівня, бета для тренду, гамма для сезонності) шляхом максимізації правдоподібності, що дозволяє адаптуватися до

адитивних або мультиплікативних структур даних. Таким чином, запропоновані бенчмарки є відповідними для перевірки складних авторегресійних моделей, таких як SARIMA, шляхом порівняння їхньої здатності обробляти нестаціонарність або зрушення.

У табл. 1 наведено основні метрики оцінки точності прогнозування для трьох моделей (SARIMA, ETS, сезонне наївне прогнозування) на трьох часових горизонтах: короткостроковому (вересень 2021 – серпень 2022), післяінтервенційному (вересень 2021 – грудень 2024) та повному тестовому періоді (липень 2021 – грудень 2024). Метрики включають: RMSE (Root Mean Squared Error), що вимірює середню величину помилок прогнозу, надаючи більшу вагу більшим відхиленням; MAE (Mean Absolute Error), що відображає середню абсолютну різницю між прогнозами та фактичними значеннями; MAPE (Mean Absolute Percentage Error), яка показує відносну похибку прогнозу у відсотках. Ці метрики дозволяють оцінити, як моделі справляються з прогнозуванням велосипедного трафіку після реконструкції Бруклінського мосту у вересні 2021 року, яка, ймовірно, спричинила структурний зсув у даних через збільшення велотрафіку.

Таблиця 1 – Порівняння метрик моделі SARIMA та бенчмарків

Період	Модель			
	Метрика	SARIMA	ETS	Сезонне наївне прогнозування
Короткий горизонт	RMSE	38 830,0	51 448,0	42 128,9
	MAPE	43 %	55 %	46 %
	MAE	35 845,7	46 949,4	38 523,5
Післяінтерв. період	RMSE	49 222,1	83 640,2	56 817,4
	MAPE	44 %	79 %	52 %
	MAE	44 009,1	76 507,5	51 500,9
Весь період	RMSE	50 383,1	81 635,2	55 456,9
	MAPE	46 %	76 %	50 %
	MAE	45 694,4	73 113,7	49 227,1

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів (табл. 1) свідчить, що модель SARIMA систематично перевершує бенчмаркові підходи за основними метриками точності за всі три розглянуті періоди. Зокрема, значення RMSE, MAPE та MAE для SARIMA залишаються нижчими, що підтверджує її здатність адекватно враховувати сезонні та трендові компоненти. Водночас, попри відносну стійкість, SARIMA демонструє погіршення якості прогнозування після інтервенції. Це означає, що хоча SARIMA є точнішою, ніж базові методи, вона все ж таки залишається вразливою до непередбачуваних змін у динаміці велотрафіку, пов'язаних із зовнішніми подіями чи інфраструктурними трансформаціями.

Для додаткового підтвердження зсуву проведемо аналіз CUSUM/CUSUMSQ (рис. 6), що дозволяють виявити момент і характер змін у даних [12, 13]. Кумулятивні тести CUSUM (Cumulative Sum) та CUSUMSQ (Cumulative Sum of Squares) були запропоновані Брауном, Дурбіном та Евансом у праці [14]. Тест CUSUM базується на кумулятивній сумі нормованих резидуалів і призначений для перевірки стабільності середнього рівня помилок, тоді як CUSUMSQ аналізує кумулятивну суму квадратів резидуалів для виявлення змін у дисперсії. Довірчі межі для тестів обчислювалися з 5 %-им рівнем значущості та з урахуванням кількості спостережень ($T \approx 40$), що дозволяє оцінити, чи лінії виходять за межі $\pm\, 0{,}948\,\sqrt{T}$ для CUSUM.

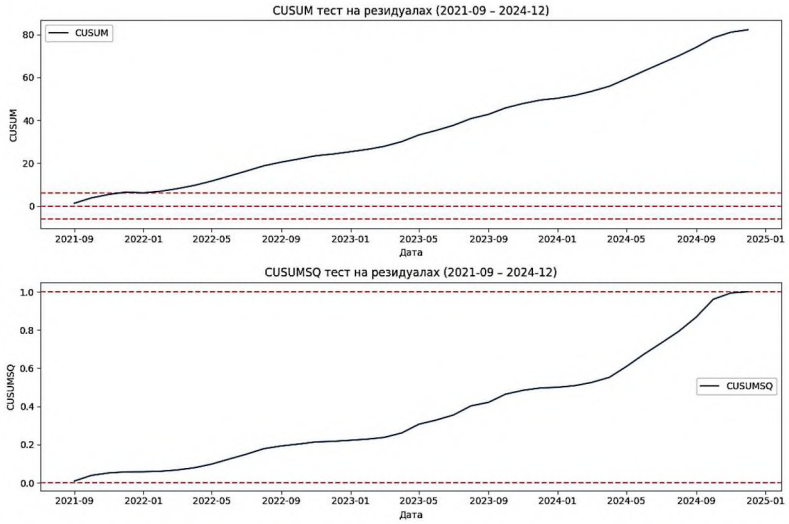


Рис. 6. CUSUM і CUSUMSQ на резидуалах (вересень 2021 – грудень 2024)
Джерело: розроблено авторами.

Аналіз графіка CUSUM показав, що кумулятивна сума резидуалів починає поступово зростати з вересня 2021 року, але значно виходить за верхню довірчу межу приблизно з травня-червня 2022 року, досягаючи значення близько 70-80 до кінця 2024 року. Це свідчить про систематичний зсув у рівні резидуалів, де модель SARIMA недооцінює фактичні значення велотрафіку, що може бути пов'язано з ефектом реконструкції Бруклінського мосту, яка, ймовірно, спричинила стійке зростання трафіку через покращення інфраструктури. Такий поступовий, але стійкий вихід за межі підтверджує гіпотезу про структурний злам, що накопичується з часом [15].

Графік CUSUMSQ демонструє лінійне зростання кумулятивної суми квадратів резидуалів до середини 2023 року, після чого спостерігається прискорення, з досягненням значення близько 1,0 раніше, ніж наприкінці періоду. Це свідчить про зміну дисперсії помилок прогнозу, що може відображати зростання волатильності даних велотрафіку, наприклад, через нові сезонні патерни чи додаткові фактори впливу після реконструкції. Загалом, результати кумулятивних тестів підтверджують наявність структурного зсуву, який не було враховано моделлю SARIMA, навченої на даних до червня 2021 року. На основі цього в майбутніх дослідженнях доцільним є включення інтервенційних змінних для покращення прогнозів моделі SARIMA.

Казуальний аналіз із допомогою DiD. Для оцінки причинно-наслідкового ефекту реконструкції Бруклінського мосту на велотрафік було використано метод різниць у різницях (Difference-in-Differences, DiD), який порівнює зміни в групі обробки (Бруклінський міст) з контрольною групою (Мангеттенський міст, де велодоріжка була відокремлена у 2004 році). Використання DiD обґрунтоване його здатністю оцінювати казуальний ефект у природному експерименті з двома групами (групі обробки та контрольній) і двома періодами (до та після реконструкції) [16]. Основний результат дослідження показує статистично значущий позитивний ефект реконструкції велодоріжки на Бруклінському мосту. DiD оцінка дорівнює 26 713 додаткових велосипедних поїздок на місяць ($SE = 4\,516$, $p < 0{,}001$). Також 95 %-ий довірчий інтервал для цього ефекту становить $[17\,862;\ 35\,564]$ поїздок на місяць.

Зауважимо, що для застосування цього методу обов'язковим є виконання умови паралельності трендів. Перевірка припущення про паралельні тренди проводилася для періоду з грудня 2013 до липня 2020 року, оскільки подальший період (серпень 2020 – вересень 2021) характеризувався значним впливом пандемії COVID-19 як екзогенного стресового фактору. Тест паралельних трендів підтвердив валідність використання DiD підходу: коефіцієнт взаємодії *Treatment*×*Time* становив $-214{,}01$ з $p = 0{,}084 > 0{,}05$, що свідчить про відсутність

статистично значущих відмінностей у трендах між мостами до початку пандемії. Для додаткової перевірки умови паралельності побудовано графік динаміки середніх значень місячного велотрафіку в доінтервенційний період (рис. 7). Візуальна оцінка отриманого графіка узгоджується з результатами формального тесту і підтверджує гіпотезу про паралельність трендів. Крім того, виконано оцінку на підвибірці, з якої повністю вилучено період пандемії. В обох випадках ефект реконструкції залишався статистично значущим і становив від $+20$ до $+27$ тис. поїздок на місяць ($p < 0{,}001$). Це дозволяє стверджувати, що зростання велотрафіку не може бути пояснене виключно пандемічними чинниками. Додавання цього контролю не змінює основних результатів: оцінений ефект реконструкції Бруклінського мосту залишається стабільним і статистично значущим, що підтверджує незалежність виявленого ефекту від пандемічних факторів.

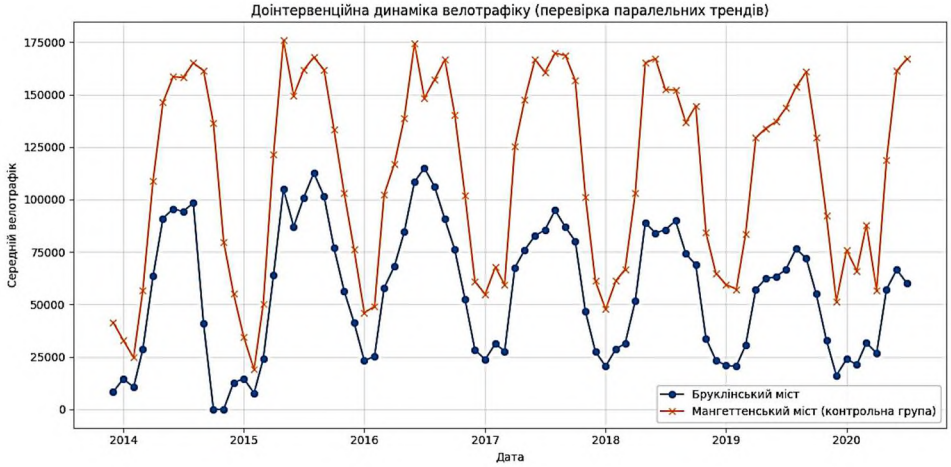


Рис. 7. Графік доінтервенційної динаміки середніх значень місячного велотрафіку для досліджуваної та контрольної груп

Джерело: розроблено авторами.

Також у модель було додано сезонні контролі (місячні фіксовані ефекти), що дало змогу відокремити вплив сезонності (холодна пора року – менше велосипедних поїздок) від впливу реконструкції. Результати (див. табл. 2) показали, що навіть після врахування циклічних коливань оцінка ефекту залишалася стабільною. Згідно з розрахунками, реконструкція призвела до відносного збільшення велосипедного трафіку на 48,4 % порівняно з базовим рівнем. Це свідчить про суттєве практичне значення втручання, яке виходить за межі статистичної значущості та має важливі наслідки для міської транспортної політики.

Таблиця 2 – Результати базової DiD регресії

Змінна	Коефіцієнт	Стандартна помилка (SE)	z-статистика	p-значення	95 %-ий довірчий інтервал
DiD ефект	26 713	4 516	5,92	<0,001	[17 862; 35 564]
Група обробки	-61 270	2 907	-21,08	<0,001	[-67 000; -55 560]
Післяінтервенційний період	17 950	2 818	6,37	<0,001	[12 400; 23 500]
COVID контроль	601	4 497	0,13	0,894	[-8 212; 9 414]
Сезонні ефекти (весна-літо)					
Березень	21 710	5 527	3,93	<0,001	[10 900; 32 500]
Квітень	49 760	5 559	8,95	<0,001	[38 900; 60 700]
Травень	80 510	5 554	14,50	<0,001	[69 600; 91 400]
Червень	87 510	5 576	15,69	<0,001	[76 600; 98 400]
Липень	85 890	5 343	16,07	<0,001	[75 400; 96 400]
Серпень	92 910	5 311	1,49	<0,001	[82 500; 103 300]
Константа	64 550	4 477	14,42	<0,001	[55 800; 73 300]

Джерело: розроблено авторами.

Тести на робастність. Тестування різних дат початку post-treatment періоду демонструє стабільність основного результату. Усі альтернативні специфікації показують статистично значущі додатні ефекти в діапазоні $22\,887 - 27\,055$ поїздок на місяць, що підтверджує робастність основного висновку.

Окремий аналіз для теплої пори року (березень-серпень), коли велосипедна активність досягає свого піку, показав ще більший ефект у розмірі $+\,33\,276$ поїздок на місяць ($p < 0{,}001$). Це підтверджує, що позитивний вплив реконструкції особливо виражений у періоди найвищої велосипедної активності. Аналіз із повним виключенням періоду пандемії березень 2020-вересень 2021 показав ефект у розмірі $+\,20\,469$ поїздок на місяць ($p < 0{,}001$). Хоча цей результат дещо менший за основну оцінку, він залишається статистично та практично значущим (табл. 3).

Таблиця 3 – Тести на робастність

Тип тесту		DiD ефект	p-значення
Альтернативні точки початку post-treatment	Серпень 2021	22 887	<0,001
	Вересень 2021	25 206	<0,001
	Жовтень 2021 (фактична)	26 713	<0,001
	Листопад 2021	27 055	<0,001
Сезонність (березень-серпень)		33 276	<0,001
Повне виключення COVID періоду		20 469	<0,001

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Реконструкція Бруклінського мосту з відокремленням велодоріжки у вересні 2021 року мала значний позитивний вплив на велотрафік, що підтверджено DiD 26 713 поїздок на місяць ($SE = 4\,516, p < 0{,}001$) та тестами на робастність до початку післяінтервенційного періоду, сезонності та пандемії COVID-19. Ці результати свідчать про ефективність інфраструктурних змін для підвищення мобільності. Модель SARIMA виявила обмеження у врахуванні структурного зсуву після реконструкції, що підтверджено тестами CUSUM/CUSUMSQ, які вказали на злам із травня 2022 року. Це підкреслює необхідність адаптації моделей до інтервенційних ефектів. Рекомендується подальше дослідження з використанням інтервенційних моделей (наприклад, ARIMAX) та проведенням інших типів контролю, наприклад, синтетичного SCM. Досвід Бруклінського мосту може бути адаптований до українських міст, таких як Київ (міст Патона), із урахуванням місцевих даних і сезонних факторів. Проте варто зазначити, що ключовим елементом такої адаптації є не лише проєктування інженерних рішень, але й систематичний збір даних про транспортний трафік як на досліджуваному мосту, так і на мості, який слугуватиме контрольною групою, ще до початку реконструкції з метою проведення подальшого аналізу. Це дозволить застосувати різноманітні методи оцінки ефективності впроваджених змін, зокрема і метод DID.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у процесі написання тексту статті

При підготовці статті було використано Chat GPT і Grok для пошуку наукових статей за тематикою дослідження, перевірки Python-коду, оформлення графіків, а також виявлення та виправлення стилістичних і граматичних помилок у тексті. Весь згенерований контент був уважно переглянутий та відредагований, тому згідно з політикою компаній OpenAI та xAI ця стаття вважається інтелектуальною власністю її авторів і вони беруть на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Fishman, E. (2015). Cycling as transport. *Transport Reviews, 36(1)*, 1-8. https://doi.org/10.1080/_01441647.2015.1114271.

2. Piatkowski, D. P., & Marshall, W. E. (2015). Not all prospective bicyclists are created equal: The role of attitudes, socio-demographics, and the built environment in bicycle commuting. *Travel Behaviour and Society, 2(3)*, 166-173. https://doi.org/10.1016/j.tbs.2015.02.001.

3. Buehler, R., & Dill, J. (2015). Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling. *Transport Reviews*, *36(1)*, 9-27. https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069908.

4. Winters, M., Branion-Calles, M., Therrien, S., et al. (2018). Impacts of bicycle infrastructure in mid-sized cities (IBIMS): Protocol for a natural experiment study in three Canadian cities. *BMJ Open, 8*, e019130. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019130.

5. Schrauth, Philipp, The Causal Effect of Cycling Infrastructure on Traffic and Accidents: Evidence from Pop-Up Bike Lanes in Berlin. *Preprints.*http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333192.

6. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. and Ljung, G.M. (2016) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. (5th ed.). Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

7. Shumway, R.H. and Stoffer, D.S. (2017) *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples*. Fourth Edition, Springer Texts in Statistics, Springer, Cham.

8. Wei, W. W. S. (2006). *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods.* (2nd ed.). Pearson.

9. Hamilton, J. D. (1994) *Time Series Analysis*. Princeton University Press, Princeton. https://doi.org/10.1515/9780691218632.

10. Lysetska, O. (2025). *BrooklynBridgePaper*. GitHub. https://github.com/OleksandraLysetska/BrooklynBridgePaper.

11. New York City Department of Transportation. (2024). *Eco-Counter – Brooklyn Bridge and Manhattan Bridge cycling data*. https://newyorkcitydot.eco-counter.com/site/300020904?year=2024&month=12.

12. Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice*. (3rd ed.). OTexts. https://otexts.com/fpp3/.

13. Gardner, E. S., Jr. (2006). Exponential smoothing: The state of the art – Part II. *International Journal of Forecasting, 22(4)*, 637-666. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005.

14. Brown, R. L., Durbin, J., & Evans, J. M. (1975). Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 37(2)*, 149-192. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1975.tb01532.x.

15. Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K., & Kleiber, C. (2003). strucchange: An R package for testing for structural change in linear regression models. *Journal of Statistical Software, 7(2)*, 1-38. https://doi.org/10.18637/jss.v007.i02.

16. Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton, NJ: Princeton University Press. https://doi.org/10.1515/9781400829828.

References

1. Fishman, E. (2015). Cycling as transport. *Transport Reviews, 36(1)*, 1-8. https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1114271.

2. Piatkowski, D. P., & Marshall, W. E. (2015). Not all prospective bicyclists are created equal: The role of attitudes, socio-demographics, and the built environment in bicycle commuting. *Travel Behaviour and Society, 2(3)*, 166-173. https://doi.org/10.1016/j.tbs.2015.02.001.

3. Buehler, R., & Dill, J. (2015). Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling. *Transport Reviews*, *36(1)*, 9-27. https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069908.

4. Winters, M., Branion-Calles, M., Therrien, S., et al. (2018). Impacts of bicycle infrastructure in mid-sized cities (IBIMS): Protocol for a natural experiment study in three Canadian cities. *BMJ Open, 8*, e019130. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019130.

5. Schrauth, Philipp, The Causal Effect of Cycling Infrastructure on Traffic and Accidents: Evidence from Pop-Up Bike Lanes in Berlin. *Preprints.*http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333192.

6. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C. and Ljung, G.M. (2016) *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. (5th ed.). Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

7. Shumway, R.H. and Stoffer, D.S. (2017) *Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples*. Fourth Edition, Springer Texts in Statistics, Springer, Cham.

8. Wei, W. W. S. (2006). *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods.* (2nd ed.). Pearson.

9. Hamilton, J. D. (1994) *Time Series Analysis*. Princeton University Press, Princeton. https://doi.org/10.1515/9780691218632.

10. Lysetska, O. (2025). *BrooklynBridgePaper*. GitHub. https://github.com/OleksandraLysetska/BrooklynBridgePaper.

11. New York City Department of Transportation. (2024). *Eco-Counter – Brooklyn Bridge and Manhattan Bridge cycling data*. https://newyorkcitydot.eco-counter.com/site/300020904?year=2024&month=12.

12. Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and Practice*. (3rd ed.). OTexts. https://otexts.com/fpp3/.

13. Gardner, E. S., Jr. (2006). Exponential smoothing: The state of the art – Part II. *International Journal of Forecasting, 22(4)*, 637-666. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005.

14. Brown, R. L., Durbin, J., & Evans, J. M. (1975). Techniques for testing the constancy of regression relationships over time. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 37(2)*, 149-192. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1975.tb01532.x.

15. Zeileis, A., Leisch, F., Hornik, K., & Kleiber, C. (2003). strucchange: An R package for testing for structural change in linear regression models. *Journal of Statistical Software, 7(2)*, 1-38. https://doi.org/10.18637/jss.v007.i02.

16. Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). *Mostly Harmless Econometrics: An Empiricist's Companion*. Princeton, NJ: Princeton University Press. https://doi.org/10.1515/9781400829828.

Отримано 18.09.2025

UDC 656.1:796.6:519.866

Olena Kuchkovska[1], Oleksandra Lystska[2], Lesia Fundak[3]

[1]Student of the Department of Mathematical Modeling of Social and Economics Processes
Ivan Franko National University of Lviv (Lviv, Ukraine)
E-mail: olena.ky92@ukr.net

[2]PhD in Mathematics, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling of Social and Economics Processes
Ivan Franko National University of Lviv (Lviv, Ukraine)
E-mail: oleksandra.lysetska@lnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0000-0730-7222
ResearcherID: OEO-3467-2025

[3]Assistant of the Department of Mathematical Modeling of Social and Economics Processes
Ivan Franko National University of Lviv (Lviv, Ukraine)
E-mail: lesya.fundak@lnu.edu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5091-6971

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF SEPARATED BIKE LANES: A COMBINED TIME SERIES AND THE CAUSAL ANALYSIS APPROACH ON THE EXAMPLE OF THE BROOKLYN BRIDGE

This paper examines the impact of the September 2021 reconstruction of the Brooklyn Bridge in New York City, which introduced a separated bicycle lane, on urban cycling flows. To evaluate the causal effect of this intervention, we employ a combined methodological approach: Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA) models for time series forecasting and a Difference-in-Differences (DiD) framework with the Manhattan Bridge, where a similar separation had been implemented much earlier, as the control group.

The SARIMA model demonstrated strong predictive performance in the pre-intervention period (MAPE ≈ 25,5 %, RMSE ≈ 10,400), capturing both seasonal and trend components of cycling traffic. However, following the intervention, forecast accuracy deteriorated substantially (MAPE ≈ 51 %, RMSE ≈ 55,000), indicating the presence of a structural break in the data. Complementary CUSUM and CUSUMSQ tests confirmed systematic underestimation of observed cycling flows starting in mid-2022, further supporting the hypothesis of a lasting structural shift caused by the infrastructure change.

Causal inference through DiD analysis revealed a statistically significant and robust positive effect of the separated bike lane: an estimated increase of approximately 26,700 additional trips per month ($p < 0,001$), corresponding to a relative growth of 48,4 % compared to the baseline level. Robustness checks, including alternative intervention dates, exclusion of the COVID-19 period, and seasonal subsamples, consistently confirmed the magnitude and significance of the treatment effect.

These findings highlight the substantial benefits of investments into the bicycle infrastructure, showing that the introduction of separated cycling lanes can significantly reshape urban mobility patterns. The integration of SARIMA forecasting with DiD causal inference provides a comprehensive framework for evaluating the effectiveness of urban transport interventions, accounting for both predictive accuracy and causal interpretation. Future research should focus on extending this framework with intervention-based ARIMAX models and synthetic control methods to further isolate exogenous shocks and structural changes. The Brooklyn Bridge case offers practical insights for urban policymakers worldwide and may serve as a valuable reference for Ukrainian cities, such as Kyiv, when planning the reconstruction of the Paton Bridge with integrated cycling infrastructure.

Keywords: *cycling infrastructure; SARIMA; Difference-in-Differences; CUSUM/CUSUMSQ; forecasting; robustness.*
Fig.: 7. Table: 3. References: 16.

Кучковська О. В., Лисецька О. Ю., Фундак Л. І. Оцінка ефективності відокремлених велодоріжок: комбінований підхід часових рядів та причинно-наслідкового аналізу на прикладі Бруклінського моста. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 310-321. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-310-321.

РОЗДІЛ ІІІ. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-322-330
УДК 662:676.2

Віта Василівна Галиш[1], Інна Миколаївна Трус[2], Ольга Василівна Ященко[3], Марина Олександрівна Громнадська[4], Павло Романович Зубик[5]

[1]доктор технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна);
доктор технічних наук,
науковий співробітник лабораторії кінетики та механізмів хімічних перетворень на поверхні твердих тіл
Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка НАН України (Київ, Україна)
E-mail: v.galysh@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7063-885X. **ResearcherID:** I-4202-2016

[2]доктор технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0001-6368-6933. **ResearcherID:** I-3204-2017

[3]кандидат технічних наук, провідний інженер кафедри екології та технології рослинних полімерів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: voliav1989@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3716-8707. **ResearcherID:** AAJ-9408-2020

[4]доктор філософії, старший викладач кафедри промислової біотехнології та біофармації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: hro.maryna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8165-561X. **ResearcherID:** R-9377-2017

[5]аспірант кафедри промислової біотехнології та біофармації
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: pv.zubyk@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0435-0254

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЛУЖНОЇ ОБРОБКИ ПШЕНИЧНОЇ СОЛОМИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

Досліджено процес лужної обробки пшеничної соломи з метою вилучення полісахаридної фракції для подальшого перетворення на рідке біопаливо. Для встановлення впливу концентрації гідроксиду натрію (2-6 %) та тривалості обробки (30-150 хв) на ефективність делігніфікації реалізовано план повного факторного експерименту типу 2^2. Побудовано регресійні моделі процесу, перевірено їх адекватність статистичними критеріями Кохрена та Фішера. Встановлено, що підвищення концентрації лугу сприяє зменшенню вмісту лігніну, але супроводжується зниженням виходу твердої фракції, що свідчить про часткову втрату вуглеводної складової. Застосовано узагальнену функцію бажаності Харрінгтона для визначення оптимальних параметрів обробки (2,2 % розчин NaOH протягом 89 хв, функції бажаності – 0,6906).

Ключові слова: *целюлозний продукт; делігніфікація; лігнін; біопаливо; біоетанол.*
Рис.: 1. Табл.: 4. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Зростання населення планети та постійний промисловий розвиток спричиняють дедалі вищий попит на енергетичні ресурси. Це, у поєднанні з небезпекою кліматичних змін та обмеженості запасів викопних енергоресурсів, вимагає переходу до екологічно безпечних і відновлюваних джерел енергії. Одним із перспективних рішень є біопаливо другого покоління, що виробляється з нехарчової біомаси [1]. Таке паливо здатне зменшити залежність від традиційних енергоносіїв і скоротити обсяг парникових викидів. На відміну від біопалива першого покоління, воно не створює конкуренції з аграрним виробництвом, а отже, є більш дружнім до довкілля варіантом [2].

Сільськогосподарські залишки та побічні продукти агровиробництва становлять величезний, проте значною мірою недооцінений і неефективно використовуваний ресурс. У багатьох випадках такі матеріали піддаються спаленню або просто залишаються на полях для природного розкладання, що супроводжується викидом парникових газів, зокрема метану та вуглекислого газу, а також погіршенням стану ґрунтів та атмосферного повітря. Ігнорування потенціалу цієї сировини не лише втрата з погляду енергетики, а й чинник негативного впливу на довкілля [3; 4].

© В. В. Галиш, І. М. Трус, О. В. Ященко, М. О. Громнадська, П. Р. Зубик, 2025

Раціональне використання агровідходів шляхом їх перетворення на альтернативні види палива, зокрема біоетанол, відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку, сприяє зменшенню залежності від викопних джерел енергії, а також впровадженню принципів циркулярної економіки, де відходи розглядаються як вторинна сировина для створення нових цінних продуктів.

Постановка проблеми. Одним із найперспективніших джерел для виробництва біопалива є лігноцелюлозна біомаса – структурний компонент рослин, що складається переважно з трьох структурних полімерів: целюлози, геміцелюлози та лігніну. До складу також входять у незначних кількостях екстрактивні компоненти та зольні елементи. З целюлози й геміцелюлоз за допомогою гідролізу можна отримати цукри, придатні для подальшого зброджування в біоетанол [5].

Однак ефективне використання лігноцелюлозної сировини стикається з рядом технологічних викликів. Її природна стійкість зумовлена складною та щільною структурою, де лігнін виконує роль захисного бар'єра, інкапсулюючи вуглеводні полімери та ускладнюючи доступ ферментів до целюлози й геміцелюлоз. Крім того, лігнін та продукти його розпаду можуть інгібувати дію ферментів та мікроорганізмів, що беруть участь у процесі ферментації, знижуючи загальний вихід цільового продукту [6].

З огляду на це, ключовим етапом у технології біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси є стадія попередньої обробки, метою якої є деструкція структури сировини, зниження вмісту лігніну, підвищення доступності полісахаридів до дії гідролітичних ферментів [7]. Успішна реалізація цієї стадії безпосередньо впливає на ефективність усього виробничого процесу та кінцеву продуктивність перетворення [8; 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні розроблено широкий спектр методів такої обробки, які поділяються на фізичні (механічне подрібнення, термічне впливання), хімічні (кислотна чи лужна обробка), біологічні (використання ферментів або мікроорганізмів), а також комбіновані фізико-хімічні технології [10].

Серед усього розмаїття підходів лужна обробка, зокрема з використанням гідроксиду натрію, вважається однією з найефективніших та економічно обґрунтованих технологій. Вона забезпечує видалення лігніну зі структури біомаси, зберігаючи при цьому цілісність вуглеводної фракції. Завдяки цьому підвищується ефективність ферментативного гідролізу та загальний вихід цукрів, придатних для зброджування у біоетанол [11; 12]. Крім того, лужна попередня обробка має вагомі переваги: відносно м'які умови проведення, можливість повторного використання реагентів [13; 14]. Це робить її привабливою не лише для лабораторного, але і для промислового застосування в технологіях виробництва біопалива з агровідходів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри отримані результати щодо лужної обробки рослинних відходів агропромислового комплексу, подальшого вивчення потребують питання збереження полісахаридної фракції під час інтенсивної делігніфікації. Недостатньо досліджено вплив лужних реагентів на вихід і якість целюлозних продуктів.

Метою роботи є дослідження лужної обробки соломи пшениці для вилучення її полісахаридної складової для подальшого перетворення на рідке біопаливо.

Виклад основного матеріалу досліджень. Для проведення дослідження як вихідну сировину використано солому пшениці врожаю 2024 року, зібрану на полях Київської області. Сировину було подрібнено до розмірів 15-20 мм для забезпечення однорідності та ефективності подальших процесів. Подрібнений матеріал зберігався в ексикаторах для

підтримки постійного рівня вологості. Аналіз хімічного складу вихідної сировини здійснювався відповідно до загальноприйнятих стандартних методик [15]. Детальний хімічний склад вихідної соломи представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад соломи пшениці

Компоненти	Вміст, %
Целюлоза	37,0
Холоцелюлоза	67,2
Лігнін	19,1
Смоли, жири, воски	4,8
Речовини, що екстрагуються гарячою водою	11,5
Речовини, що екстрагуються 1 % NaOH	38,0
Зольність	7,0

Джерело: розроблено авторами.

У межах дослідження можливості виділення полісахаридної складової солому піддавали двостадійній обробці розчином гідроксиду натрію. Концентрація лужного розчину варіювалася в діапазоні 2-6 %, гідромодуль підтримувався на рівні 5:1, а температура обробки становила 120 °С. Тривалість обробки варіювалася від 30 до 150 хвилин. Експерименти проводилися в лабораторних умовах із використанням сталевих кислотостійких автоклавів об'ємом 0,5 дм^3. У кожен автоклав завантажували 40 г абсолютно сухої подрібненої соломи, після чого додавали відповідний об'єм розчину гідроксиду натрію. Автоклави розміщували в попередньо нагрітій до заданої температури гліцериновій бані, обладнаній механічним перемішувальним пристроєм для забезпечення рівномірного нагріву.

Після завершення процесу обробки та охолодження отриманий целюлозний продукт піддавався віджиманню для відділення відпрацьованого лужного розчину. Відпрацьований розчин збирався в окремі ємності для подальшого аналізу, а целюлозний продукт ретельно промивали дистильованою водою, після чого визначали його вихід та вміст у ньому залишкового лігніну.

З метою встановлення оптимальних умов вилучення гексозовмісної фракції з лігноцелюлозної сировини було реалізовано план повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^2. У ході дослідження як незалежні змінні (фактори) було обрано:

- x_1 – концентрація лугу (%);
- x_2 – тривалість лужної обробки (хв).

Ці параметри було визначено як ключові впливові чинники, що формують якісні та кількісні характеристики кінцевого продукту. У ролі залежних змінних (функцій відгуку, $\mathbf{y_i}$) були обрані такі показники целюлозних продуктів:

- y_1 – вихід целюлозного продукту, %;
- y_2 – вміст залишкового лігніну, %.

Вихідні значення для побудови матриці планування ПФЕ типу 2^2, зокрема рівні варіювання факторів та інтервали їх змін, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Рівні варіювання та кодування незалежних факторів x_i

Фактори (x_i)	Рівні варіювання факторів			Інтервал варіювання (Δx_i)
	(+1)	(-1)	(0)	
x_1 – концентрація NaOH, %	6	2	4	2
x_2 – тривалість варіння, хв	150	30	90	30

Джерело: розроблено авторами.

Для математичного опису процесу та подальшого визначення впливу окремих факторів було побудовано математичні моделі у вигляді поліномів другого порядку. Моделювання, ідентифікація, а також статистична перевірка адекватності моделей здійснювалися

із використанням програмного забезпечення. Окрім цього, на основі отриманих моделей проведено багатокритеріальну оптимізацію з метою виявлення оптимального поєднання параметрів процесу, що забезпечують максимальний вихід продукту за мінімального вмісту лігніну.

Загальний вигляд рівняння регресії для двох незалежних змінних у формі полінома другого порядку має такий вигляд:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2, \quad (1)$$

де y_i – залежна змінна (вихід або вміст лігніну), x_1, x_2 – незалежні змінні (фактори), b_0–b_5 – коефіцієнти регресії, які визначають вплив відповідних членів моделі.

Оптимізація умов лужної обробки для отримання целюлозовмісної продукції здійснювалася із використанням методу багатокритеріальної оцінки на основі узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Значення кожної з досліджуваних залежних змінних y_i було трансформовано у відповідні функції бажаності d_i, значення яких змінюються в інтервалі від 0 до 1. При цьому шкала інтерпретується наступним чином: від d = 0,00-0,20 – «дуже погано» до d = 0,81-1,00 – «дуже добре».

Для оцінювання загального рівня оптимальності варіанту використовували узагальнену функцію бажаності D, яку обчислювали як середнє геометричне індивідуальних бажаностей:

$$D=\sqrt{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \cdot d_4 \cdot d_5}. \quad (2)$$

Для дослідження було використано однобічні профілі бажаності Харрінгтона, тобто було встановлено чітке спрямування зміни показників: наприклад, максимізація виходу та мінімізація вмісту лігніну. Такий підхід дозволяє враховувати специфіку кожного критерію з урахуванням його впливу на якість кінцевого продукту.

Процедуру пошуку оптимальних значень технологічних параметрів, зокрема концентрації лугу та тривалості варіння, виконували методом сканування (покрокового перебору) з високою точністю. Значення незалежних змінних варіювали в межах експериментального простору з кроком 0,001, що дало змогу з високою деталізацією виявити область глобального максимуму узагальненої функції бажаності.

Матриця планування експерименту та результати досліджень для двох незалежних факторів наведені у таблиці 2. Значення вихідних параметрів $\mathbf{y_i}$ у таблиці представлені у вигляді середніх арифметичних, розрахованих за результатами трьох паралельних дослідів, що забезпечує достовірність отриманих даних.

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту для двох факторів у повному факторному експерименті типу 2^2

Параметри обробки		Значення показників целюлозних продуктів	
x_1 натуральне значення (кодоване)	x_2 натуральне значення (кодоване)	y_1	y_2
2 (-1)	30 (-1)	35,8	19,2
	90 (0)	29,5	14,1
	150 (1)	25,9	13,0
4 (0)	30 (-1)	31,1	16,6
	90 (0)	26,6	13,3
	150 (1)	23,9	12,0
6 (1)	30 (-1)	28,0	16,3
	90 (0)	21,9	13,1
	150 (1)	21,2	11,8

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз результатів свідчить про те, що підвищення концентрації гідроксиду натрію у розчині з 2 до 4 % за умов варіювання тривалості процесу від 30 до 150 хвилин сприяє активізації процесів делігніфікації. Це підтверджується зменшенням вмісту залишкового лігніну на 7,2 %, що вказує на ефективне руйнування лігнінового компонента у структурі лігноцелюлозної біомаси.

Разом з тим, спостерігається зниження загального виходу твердої фракції на 11,9 %, що, ймовірно, пов'язано не лише з вилученням лігніну, а й з екстракцією супутніх компонентів – екстрактивних речовин та мінеральних домішок.

Подальше збільшення концентрації лугу до 6 % за аналогічних умов тривалості обробки (30…150 хв) зумовлює додаткове зниження вмісту лігніну ще на 4,8 %. Однак у цьому випадку також фіксується зменшення виходу твердої фракції на 9,9 %. Це свідчить про те, що на більш високих концентраціях лугу, крім реакцій делігніфікації, інтенсифікуються процеси руйнування низькомолекулярних полісахаридів, що входять до складу геміцелюлози та частково целюлози, що негативно впливає на масу залишкової твердої фази. Отже, надмірне підвищення концентрації NaOH може призводити не лише до глибшого видалення лігніну, а й до небажаних втрат вуглеводної фракції, що має бути враховано під час оптимізації умов обробки.

Обробку експериментальних результатів та побудову математичних моделей процесу варіння біомаси в лужному середовищі було здійснено із застосуванням методу найменших квадратів**.** Цей метод забезпечив визначення числових значень коефіцієнтів регресії, що найкраще апроксимують залежності між незалежними змінними (факторами) та функціями відгуку. Отримані рівняння регресії описують ефективність лужної обробки пшеничної соломи із задовільною точністю. Для перевірки адекватності побудованих моделей було використано критерії Кохрена (на перевірку однорідності дисперсій) та Фішера (на відповідність моделі експериментальним даним). За результатами статистичної обробки встановлено, що моделі відповідають умовам адекватності та можуть бути використані для подальшого аналізу й оптимізації процесу.

Числові значення регресійних коефіцієнтів, що входять до рівнянь математичних моделей, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів рівнянь регресії для показників процесу лужної обробки пшеничної соломи

Коефіцієнти рівняння регресії	Показники	
	y_1	y_2
b_0	44,21	25,32
b_1	- 1,96	- 1,98
b_2	- 0,17	- 0,12
b_3	- 0,14	0,15
b_4	0,006	0,004
b_5	0,0004	0,0004

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз значущості регресійних коефіцієнтів показав, що коефіцієнти b_4 та b_5, які відповідають квадратичним ефектам факторів x_1^2 та x_2^2, в обох випадках є статистично незначущими. Їхні значення не перевищують критичних рівнів згідно з t-критерієм Стьюдента, що свідчить про відсутність суттєвого впливу квадратичних компонентів на результати дослідження у межах досліджуваного інтервалу факторів. У зв'язку з цим, зазначені коефіцієнти можуть бути виключені з рівнянь регресії**,** що спрощує модель без втрати її адекватності.

Задача визначення оптимальних технологічних параметрів лужної обробки пшеничної соломи має багатокритеріальний характер**,** оскільки потребує одночасного врахування кількох якісних показників отриманого продукту, таких як вихід целюлозного продукту та вміст у ньому лігніну. Тому було використано метод узагальненої функції бажаності Харрінгтона**.**

Кожен із показників було трансформовано у шкалу бажаності, яка дозволяє оцінити ступінь відповідності значення конкретного параметра бажаному рівню. Значення бажаності змінювалися в діапазоні від 0 (абсолютно неприйнятний результат) до 1 (максимально бажаний результат), що дозволяє порівнювати різні показники між собою, незалежно від їхніх фізичних одиниць. Шкала бажаності для кожного з показників y_i, а також результати оптимізації технологічних параметрів, наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Шкала бажаності для показників якості целюлозних продуктів

Показник y_i	Шкала бажаності		Значення в точці оптимуму
	Дуже добре	Дуже погано	
Вихід, %	35,8	21,2	29,072
Вміст лігніну, %	11,8	19,2	14,404

Джерело: розроблено авторами.

За результатами проведених розрахунків встановлено, що оптимальними умовами лужного оброблення пшеничної соломи є використання розчину NaOH концентрацією 2,2 % та тривалість процесу 89 хвилин. Саме за цих технологічних параметрів спостерігається максимальне значення узагальненої функції бажаності за Харрінгтоном, яке дорівнює 0,6906, що свідчить про задовільний баланс між основними показниками якості обробленої сировини. Це дозволяє рекомендувати вказані параметри як раціональні для практичного впровадження в умовах промислової або напівпромислової переробки біомаси.

Компромісну область параметрів, у якій досягається високий рівень бажаності за всіма якісними показниками y_i, представлено на площині технологічних факторів x_1 та x_2 на рисунку 1. Вона демонструє зону технологічної стабільності, де незначні відхилення параметрів не призводять до суттєвого погіршення характеристик кінцевого продукту.

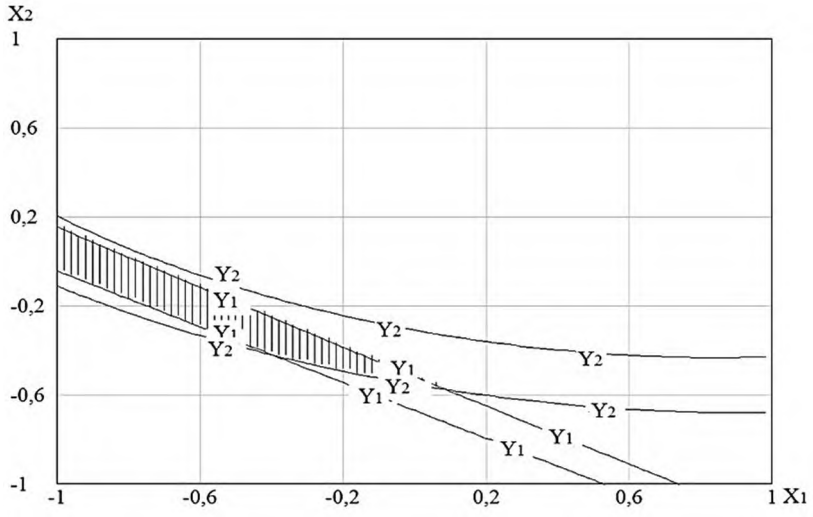


Рис. 1. Область компромісних значень параметрів лужної обробки пшеничної соломи

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати демонструють перспективність застосування технології лужної обробки для ефективної переробки твердих рослинних відходів сільськогосподарського походження, які щороку утворюються у значних обсягах. Зокрема, підтверджена доцільність використання пшеничної соломи як сировини для одержання целюлозовмісних

продуктів. Такі продукти можуть бути використані як субстрати для подальшого біотехнологічного перетворення, зокрема у процесах ферментативного гідролізу з метою отримання біоетанолу.

Одержані експериментальні дані ляжуть в основу наступного етапу досліджень, що буде присвячено оптимізації параметрів ензимного розщеплення целюлозних матеріалів та підвищенню виходу цукрів, придатних до подальшого зброджування.

Висновки. Проведено дослідження впливу концентрації гідроксиду натрію та тривалості лужної обробки пшеничної соломи на ефективність делігніфікації та вихід целюлозного продукту для подальшого її біотехнологічного перетворення на рідке біопаливо. За результатами повного факторного експерименту типу 2^2 побудовано математичні моделі процесу у вигляді поліномів другого порядку. Статистична обробка підтвердила адекватність моделей експериментальним даним.

Встановлено, що підвищення концентрації NaOH до 6 % знижує вміст лігніну, проте супроводжується значними втратами твердої фракції, зумовленими руйнуванням геміцелюлоз та частково целюлози. Це може негативно впливати на загальний вихід полісахаридів для подальшої біоетанольної конверсії.

Для забезпечення оптимального балансу між ефективністю вилучення лігніну та збереженням вуглеводної складової проведено оптимізацію параметрів із використанням методу узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Найбільш доцільними умовами обробки визначено концентрацію NaOH 2,2 % і тривалість 89 хв, за яких забезпечується найкращий баланс між ефективністю делігніфікації та збереженням вуглеводної фракції.

Отримані результати підтверджують перспективність застосування лужної обробки для підготовки лігноцелюлозної біомаси до біотехнологічного перетворення, зокрема у виробництві біоетанолу.

Список використаних джерел

1. Hirani, A. H., Javed, N., Asif, M., Basu, S. K., & Kumar, A. (2018). A review on first- and second-generation biofuel productions. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 141-154.

2. Halysh, V., Romero-García, J. M., Vidal, A. M., Kulik, T., Palianytsia, B., García, M., & Castro, E. (2023). Apricot seed shells and walnut shells as unconventional sugars and lignin sources. *Molecules*, *28*(3), 1455.

3. Trembus, I., & Mykhailenko, N. (2024). Resource-saving wheat straw processing technology. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, *59*(3), 585-590.

4. Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., & Myshak, V. D. (2023). Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Applied Nanoscience*, *13*(12), 7455-7468.

5. Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. In *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production* (pp. 7–12). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2.

6. Yuan, Y., Jiang, B., Chen, H., Wu, W., Wu, S., Jin, Y., & Xiao, H. (2021). Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, *14*(1), 205.

7. Jain, S., Kumar, S. (2024). Advances and challenges in pretreatment technologies for bioethanol production: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100053.

8. Zhao, L., Sun, Z. F., Zhang, C. C., Nan, J., Ren, N. Q., Lee, D. J., et al. (2022). Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, *343*, 126123.

9. Beig, B., Riaz, M., Naqvi, S. R., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., et al. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, *287*, 119670.

10. Rusănescu, C. O., Ciobanu, M., Rusănescu, M., Dinculoiu, R. L. (2024). Pretreatments applied to wheat straw to obtain bioethanol. *Appl. Sci.*, *14*(4), 1612.

11. Sun, S., Zhang, L., Liu, F., Fan, X., Sun, R. C. (2018). One-step process of hydrothermal and alkaline treatment of wheat straw for improving the enzymatic saccharification. *Biotechnol. Biofuels*, *11*(1), 137.

12. Shah, T. A., Khalid, S., Nafidi, H. A., Salamatullah, A. M., Bourhia, M. (2023). Sodium hydroxide hydrothermal extraction of lignin from rice straw residue and fermentation to biomethane. *Sustain.*, *15*(11), 8755.

13. Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *7*, 100396.

14. Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, *199*, 42-48.

15. Barbash, V., Poyda, V., & Deykun, I. (2011). Peracetic acid pulp from annual plants. *Cellulose chemistry and Technology*, *45*(9), 613.

References

1. Hirani, A. H., Javed, N., Asif, M., Basu, S. K., & Kumar, A. (2018). A review on first- and second-generation biofuel productions. *Biofuels: Greenhouse Gas Mitigation and Global Warming: Next Generation Biofuels and Role of Biotechnology*, 141-154.

2. Halysh, V., Romero-García, J. M., Vidal, A. M., Kulik, T., Palianytsia, B., García, M., & Castro, E. (2023). Apricot seed shells and walnut shells as unconventional sugars and lignin sources. *Molecules*, *28*(3), 1455.

3. Trembus, I., & Mykhailenko, N. (2024). Resource-saving wheat straw processing technology. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, *59*(3), 585-590.

4. Barbash, V. A., Yashchenko, O. V., Yakymenko, O. S., & Myshak, V. D. (2023). Extraction, properties and use of nanocellulose from corn crop residues. *Applied Nanoscience*, *13*(12), 7455-7468.

5. Bajpai, P. (2016). Structure of lignocellulosic biomass. In *Pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuel production* (pp. 7–12). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0687-6_2.

6. Yuan, Y., Jiang, B., Chen, H., Wu, W., Wu, S., Jin, Y., & Xiao, H. (2021). Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*, *14*(1), 205.

7. Jain, S., Kumar, S. (2024). Advances and challenges in pretreatment technologies for bioethanol production: A comprehensive review. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 100053.

8. Zhao, L., Sun, Z. F., Zhang, C. C., Nan, J., Ren, N. Q., Lee, D. J., et al. (2022). Advances in pretreatment of lignocellulosic biomass for bioenergy production: challenges and perspectives. *Bioresource Technology*, *343*, 126123.

9. Beig, B., Riaz, M., Naqvi, S. R., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., et al. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, *287*, 119670.

10. Rusănescu, C. O., Ciobanu, M., Rusănescu, M., Dinculoiu, R. L. (2024). Pretreatments applied to wheat straw to obtain bioethanol. *Appl. Sci.*, *14*(4), 1612.

11. Sun, S., Zhang, L., Liu, F., Fan, X., Sun, R. C. (2018). One-step process of hydrothermal and alkaline treatment of wheat straw for improving the enzymatic saccharification. *Biotechnol. Biofuels*, *11*(1), 137.

12. Shah, T. A., Khalid, S., Nafidi, H. A., Salamatullah, A. M., Bourhia, M. (2023). Sodium hydroxide hydrothermal extraction of lignin from rice straw residue and fermentation to biomethane. *Sustain.*, *15*(11), 8755.

13. Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *7*, 100396.

14. Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, *199*, 42-48.

15. Barbash, V., Poyda, V., & Deykun, I. (2011). Peracetic acid pulp from annual plants. *Cellulose chemistry and Technology*, *45*(9), 613.

Отримано 29.07.25

UDC 662.756:577.112.7

Vita Halysh[1], Inna Trus[2], OlhaYashchenko[3], Maryna Hromnadska[4], Pavlo Zubik[5]

[1]Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine);
Doctor of Technical Sciences, Researcher, Laboratory of Kinetics and Mechanisms of Chemical Transformations on the Surface of Solids, Chuiko Institute of Surface Chemistry, NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
E-mail: v.galysh@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-7063-885X. **ResearcherID:** I-4202-2016

[2]Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: inna.trus.m@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-6368-6933. **ResearcherID:** I-3204-2017

[3]PhD in Technical Sciences, Lead Engineer of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: voliav1989@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-3716-8707. **ResearcherID:** AAJ-9408-2020

[4]Doctor of Philosophy, Senior Lecturer of Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: hro.maryna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-8165-561X. **ResearcherID:** R-9377-2017

[5]Postgraduate student of Department of Industrial Biotechnology and Biopharmacy
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)
E-mail: pv.zubyk@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0003-0435-0254

RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF ALKALINE TREATMENT OF WHEAT STRAW FOR BIOETHANOL PRODUCTION

The study explores the alkaline treatment of wheat straw aimed at extracting its polysaccharide fraction for subsequent conversion into liquid biofuel. Wheat straw harvested in 2024 from the Kyiv region of Ukraine was used as raw material. The research is grounded in the understanding that lignocellulosic biomass represents one of the most promising sources of renewable carbon that does not compete with food resources. Due to its high cellulose content and wide availability, wheat straw stands out as a strategic feedstock for bioenergy production.

The comprehensive review of scientific literature and recent studies on alkaline pretreatment of wheat straw for liquid biofuel production has revealed a significant research gap, i.e.: the preservation of the polysaccharide fraction during intense delignification has received insufficient attention. This raises concerns regarding substantial losses of carbohydrate content, which in turn negatively affects the overall efficiency of biotechnological conversion processes.

The primary objective of the paper is to investigate the conditions of alkaline treatment of wheat straw to optimize the recovery of its polysaccharide fraction as a precursor for bioethanol production. A full factorial experimental design (2^2 type) was implemented to assess the effects of sodium hydroxide concentration (2–6%) and treatment duration (30–150 minutes) on the efficiency of lignin removal. Regression models describing the process were constructed and validated using Cochran's and Fisher's statistical tests for adequacy.

The study establishes for the first time that an increase in alkali concentration leads to reduction in lignin content; however, it also results in the decrease in solid fraction yield, indicating partial loss of the carbohydrate component. To determine optimal conditions for treatment, Harrington's desirability function was applied. The optimal parameters were identified as treatment with a 2.2 % NaOH solution for 89 minutes, which corresponded to the highest desirability function value of 0.6906.

The findings confirm the feasibility of utilizing wheat straw as a viable raw material for bioethanol production and provide a basis for further research into the optimization of enzymatic hydrolysis of cellulose-containing products. The developed approach contributes to the advancement of sustainable biofuel technologies based on non-food lignocellulosic feedstocks.

Keywords: *cellulosic product; delignification; lignin; biofuel; bioethanol.*

Fig.: 1. Table: 4. References: 15.

Галиш В. В., Трус І. М., Ященко О. В., Громнадська М. О., Зубик П. Р. Дослідження ефективності лужної обробки пшеничної соломи для виробництва біоетанолу. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3 (41). С. 322-330. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-322-330.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-331-338
УДК 544.4:504

Ірина Сергіївна Макєєва[1], Ольга Володимирівна Кислова[2]

[1]кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: makyeyeva.is@knutd.com.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5672-3097
Researcher ID: X-2580-2018. **SCOPUS Author ID:** 7003994762

[2]кандидат біологічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: kislova.ov@knutd.com.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-0223-1860. **SCOPUS Author ID:** 22034723000

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНО СИНТЕЗОВАНОЇ СУМІШІ Cu/Cu_2O/CuO НА ДЕСТРУКЦІЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЇ ПЛІВКИ

У роботі досліджено вплив композиції Cu/Cu_2O/CuO на швидкість деградації поліетиленової плівки під дією сонячного світла експрес-методом. Зразки плівки із вмістом 3 % гетерогенної суміші при сумарному опроміненні 120 годин продемонстрували втрату маси до 27 %, тоді як для контрольної плівки цей показник становив 2 %. Електрохімічно синтезований продукт має низку переваг під час використання: стабільність, екологічна безпека, активація випромінюванням видимого світла, можливість регулювати його фазовий склад та кристалічну структуру шляхом зміни умов електролізу.

Ключові слова: *фотокаталітична деструкція; поліетиленова плівка; композиція Cu/Cu_2O/CuO; електрохімічні методи; захист навколишнього середовища.*

Рис.: 3. Табл.: 2. Бібл.: 18.

Актуальність теми дослідження. Охорона навколишнього середовища від негативних наслідків діяльності людства є нагальною потребою сьогодення. Однією з таких проблем є забруднення довкілля полімерними матеріалами, розклад яких у природі триває від десятків до сотень років. Під дією сонячного світла, нагрівання або в результаті механічної обробки відбувається руйнування хімічних зв'язків у полімерах з утворенням низькомолекулярних продуктів розпаду. Опромінення макромолекул спричиняє реакцію деструкції поліолефінів шляхом розриву С–С зв'язків з утворенням вільних радикалів. Подальша взаємодія з киснем повітря супроводжується виділенням активних оксигеновмісних форм радикалів за ланцюговим механізмом та різних продуктів окиснення (альдегідів, кетонів, карбонових кислот тощо). Як результат спостерігається втрата міцності полімерних матеріалів, пожовтіння та збільшення крихкості [1,2].

Для пришвидшення процесу деструкції полімерів використовують каталізатори: для термічного крекінгу – цеоліти з утворенням ароматичних сполук, алюмосилікати, солі перехідних металів (Феруму, Купруму); для деструкції в рідкі паливні продукти – Pd, Pt, Ru, Ni на носіях (Al_2O_3, C), для біокаталітичної деструкції – мікроорганізми та ферменти [2-4].

Для руйнування тонких плівок полімерів перспективним напрямком є застосування фотокаталізаторів – напівпровідникових матеріалів на основі оксидів металів (TiO_2, NiO, суміш Cu_2O – CuO, ZnO, Fe_2O_3, SnO_2, ZrO_2), у молекулах яких під час поглинання електромагнітного випромінювання відбувається перехід валентних електронів зі зв'язаного стану у вільний [5]. Фотокаталізатор поглинає фотони з енергією, яка є вищою за енергію забороненої зони, електрони у валентній зоні (ВЗ) можуть збуджуватися та переміщуватися в зону провідності (ЗП), де утворюється дірка (h^+):

$$\text{Фотокаталізатор} + h\upsilon = \text{фотокаталізатор} + h^+ + e^- \quad (1)$$

Фотогенеровані електрони та дірки ефективно відокремлюються та переміщуються на поверхню фотокаталізатора, запускаючи вторинні реакції. Утворюються вільні радикали, які беруть участь в окисненні органічних сполук з утворенням проміжних продуктів та призводять до деградації токсичних домішок. Кінцевий результат процесів можна описати таким рівнянням:

$$h^+ + \text{токсичні домішки} = H_2O + CO_2 + \text{продукти деградації}. \quad (2)$$

© І. С. Макєєва, О. В. Кислова, 2025

Таким чином, фотокаталізатори прискорюють хімічну реакцію та розширюють спектр довжин хвиль світла, під дією яких відбувається реакція [5; 6].

Популярний фотокаталізатор TiO_2 має широку заборонену зону (~3,2 еВ), тому його активація відбувається під впливом ультрафіолетового випромінювання ($\lambda < 385$ нм), яке становить лише 3…5 % сонячного спектра. Після збудження часто відбувається швидка рекомбінація електронів та дірок, що зумовлює зменшення кількості активних радикалів ($\bullet OH$, $\bullet O_2^-$). Отже, цей фотокаталізатор є неефективним під час використання природного світла. Низька селективність та потенційна токсичність наночастинок є іншими негативними факторами. Модифіковані форми TiO_2, доповані домішками йонів металів або напівпровідниками з меншою шириною забороненої зони та оптимізованою мікроструктурою, є складними у виробництві та дорогими. Усе це значно звужує можливості використання титан (IV) оксиду [6; 7].

Постановка проблеми. Актуальним завданням є пошук нових стабільних фотокаталізаторів, які активуються світлом видимого діапазону. Дослідження недорогих та доступних напівпровідників на основі купрум (I, II) оксидів відкриває перспективу для широкого їх застосування в деструкції полімерних матеріалів та дозволяє зробити цю технологію дешевою та безпечною.

Аналіз досліджень та публікацій. Створення композитів з двох напівпровідників є одним із напрямків для збільшення ефективності фотокаталізу завдяки кращому розподілу зарядів і розширенню діапазону активуючого випромінювання, зниженню швидкості рекомбінації електронів та дірок.

Фотокаталізатори на основі купрум (I, II) оксидів є ефективними для окиснення органічних речовин та виробництва відновлюваної енергії [8; 9]. Показано, що фотокаталітична активність композитів суттєво залежить від їхнього складу та структури, які впливають на площу поверхні та пористість матеріалів [10, 11].

Згідно з літературними даними [12], купрум (I, II) оксиди мають наступні властивості (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика властивостей купрум (I, II) оксидів

Характеристики напівпровідників	Cu_2O	CuO
Тип напівпровідника	Прямозонний	Непрямозонний
Оптична глибина поглинання (нм)	≈1000	≈500
Оптична ширина забороненої зони (еВ)	2,1	1,7
Довжина дифузії носіїв (нм)	≈500	≈200

Джерело: розроблено авторами.

Cu_2O використовувався як фотокаталізатор видимого світла безпосередньо для розщеплення води та деградації органічних забруднень. Існує кілька переваг використання Cu_2O як фотокаталізатора. По-перше, він має низьку токсичність, є екологічно безпечним, недорогим та легкодоступним. По-друге, ширина забороненої зони Cu_2O може коригуватись розміром його частинок. Cu_2O здатний адсорбувати молекулярний кисень O_2, який може поглинати фотоелектрони та обмежувати взаємодію електронів і дірок [11].

Cu_2O здатний окиснюватись до CuO, якщо фотогенеровані дірки не можуть бути ефективно видалені. Проведені дослідження показали, що частинки Cu_2O можна стабілізувати за допомогою пасивуючої тонкої плівки CuO на їх поверхні, що запобігає подальшому окисненню [10; 11]. Отже, CuO-Cu_2O композит зазвичай є гетероструктурою двох p-типових напівпровідників.

Таким чином, на фотокаталітичну активність часток суміші оксидів купруму впливає їх розмір, який визначає й основні фізичні властивості матеріалу: площа поверхні, густина, в’язкість, текучість, пористість, ступінь кристалічності, швидкість каталітичної

реакції та хімічна активність. Ці характеристики є важливими і в процесі синтезу речовин, оскільки дають можливість контролювати процес та створювати нові матеріали з унікальними властивостями.

У роботі [13] досліджено фотокаталітичні властивості гетеросистеми $Cu/Cu_2O/CuO$, отриманої шляхом одностадійного прожарювання мідної сітки на повітрі. Завдяки комбінації Cu_2O (хороший редуктор), CuO (підвищує стабільність та перенос електронів) та металічної міді (провідник електронів та проміжний шар) досягається вища ефективність фотокаталізу. Вузькі заборонені зони гетеропереходу $Cu/Cu_2O/CuO$ забезпечують широку смугу поглинання цієї суміші у видимій області та ефективне розділення електронів та дірок. Проте регулювати розмір частинок сполук утвореної суміші та їх відносну кількість у процесі окиснення неможливо [14,; 15].

Цей недолік можна усунути в результаті електрохімічного анодного окиснення металічної міді [16]. Показано, що синтезована гетеросистема $Cu/Cu_2O/CuO$ має фотокаталітичні властивості в реакції розкладу барвника метилового оранжевого у водному розчині.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Перспективним є подальше вивчення потенційних фотокаталітичних властивостей суміші $Cu/Cu_2O/CuO$, зокрема для фотоокисної деградації поліолефінових плівок, що погано піддаються звичайній біологічній деструкції у природних умовах.

Метою роботи було дослідження впливу гетеросистеми $Cu/Cu_2O/CuO$, синтезованої електрохімічним методом, на швидкість деградації поліетиленової плівки під впливом видимого світла.

Виклад основного матеріалу. Електрохімічний синтез гетеросистеми $Cu/Cu_2O/CuO$ проводили в оптимізованих умовах (температура 70 ºС, вихід за струмом 96,25 %) [16]. Склад продукту (%) наведено на рис. 1.

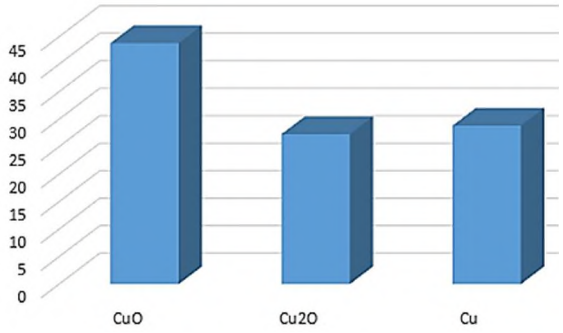


Рис. 1. Результати хімічного аналізу суміші $Cu/Cu_2O/CuO$ (%), отриманої електрохімічним методом

Джерело: розроблено авторами.

У результаті електрохімічного окиснення на аноді утворюються суміш купрум (I, II) оксидів, тоді як металічна мідь є продуктом часткового відновлення купрум оксидів на катоді, а також механічного руйнування мідного анода.

На рис. 2 представлена фотографія отриманого порошку. СЕМ-візуалізацію проводили за допомогою скануючого електронного мікроскопа Tescan Vega Compact (Tescan Vega, Брно, Чеська Республіка) під вакуумом 10 мПа. Зразки для скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) були покриті золотом за допомогою іонного розпилення JEOL Fine Coat JFC-1100 (JEOL Ltd., Токіо, Японія).

З рис. 2 видно, що часточки продукту мають різну форму. З літературних джерел відомо, що мідь має кубічну гранецентровану кристалічну ґратку, Cu_2O має кубічну (менш щільну) кристалічну ґратку, а CuO – моноклінну, яка характеризується найнижчим рівнем симетрії та складною структурою.

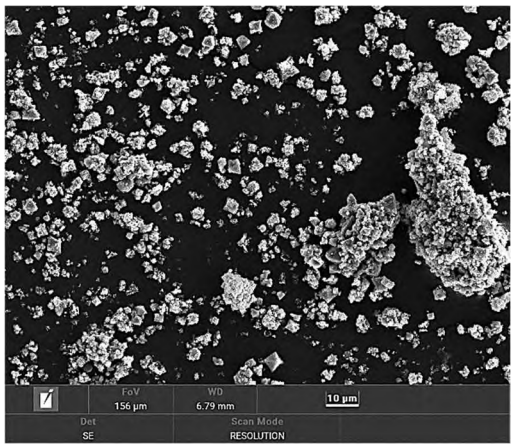


Рис. 2. Мікрофотографія продукту електролізу

Джерело: розроблено авторами.

Для вимірювання розмірів частинок використано метод лазерної дифракції, який ґрунтується на явищі розсіювання світла частинками в усіх напрямках: спостерігається дифракційна картина розподілу інтенсивності, яка залежить від розміру частинки. На основі розподілу енергії, виміряної в радіально розташованих сенсорних елементах, розраховується розподіл частинок за розмірами [17] (рис. 3).

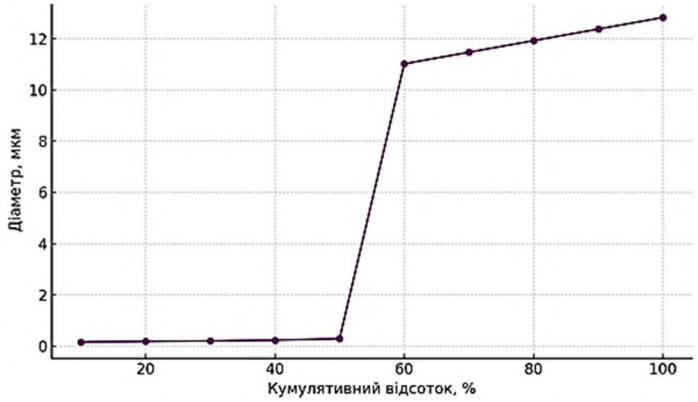


Рис. 3. Кумулятивна крива розподілу часток

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з отриманими даними, половина утворених часток до D50 має відносно компактний розмірний діапазон, тоді як після D60 спостерігається різке збільшення розміру частинок, що підтверджує наявність агломератів, які значно впливають на загальний розподіл. Синтезована композиція Cu/Cu2O/CuO є хімічно стабільною, а можливість регулювати умови проведення електролізу дозволяє варіювати її фазовий склад та кристалічну структуру.

Розробка мікроструктурованих фотокаталізаторів, які проявляють активність під дією випромінювання світла, є перспективною для майбутніх досліджень та впроваджень технологій переробки полімерних матеріалів. Використання як джерела енергії випромінювання видимого діапазону дозволить зробити технологію розкладання поліолефінів ефективною та економічно вигідною.

Для подальших досліджень фотокаталітичного впливу утвореного продукту було синтезовано поліетиленову плівку, модифіковану добавкою $Cu/Cu_2O/CuO$. Гранули поліетилену високого тиску (ДСТУ 16337-77) у кількості 0,5 г розчиняли в циклогексані при температурі 110 ^oC протягом 1 години [18]. Після повного розчинення поліетилену готували

серію зразків із добавками оксидних матеріалів (додавали 1 мас. %). Одержані зразки диспергували протягом 1 години в ультразвуковій ванні марки ВК – 90502 при потужності 50W. Застосування ультразвукової ванни дозволило підвищити ефективність диспергування внесених частинок оксидів та рівномірно розподілити їх по всьому об'єму реакційної маси. Після ультразвукової обробки розчин вносили в чашку Петрі і ставили до сушильної шафи при температурі 110 ºС до повної готовності плівки, яка легко відставала від скляної підкладки. Для контролю готували чисті плівки поліетилену, які не містять композитних матеріалів. Готові поліетиленові плівки зважували на аналітичних терезах.

Проведення фотокаталітичної деструкції полімерних матеріалів у присутності добавок оксидних матеріалів є перспективним напрямком для зменшення забруднення навколишнього середовища. Фотокаталітичну деградацію одержаних поліетиленових плівок вивчали експрес-методом при опроміненні світлом. Встановлено, що на ефективність фотокаталізатора суттєво впливають умови його введення в полімерний матеріал, інтенсивність перемішування, концентрація активної фази та тривалість опромінення. При сумарному опроміненні близько 120 годин спостерігається збільшення швидкості деградації плівки, що містить суміш оксидів. Результати дослідження наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Втрата маси (мас. %) поліетиленової плівки з гетеросистемою $Cu/Cu_2O/CuO$ залежно від тривалості опромінення

Час, години	Добавка оксидного матеріалу, (мас. %)			
	0	1	2	3
24	0	3	3	5
48	0	3	3	12
72	0	4	6	15
96	1	7	15	20
120	2	10	17	27

Джерело: розроблено авторами.

Додавання до поліетилену синтезованої суміші $Cu/Cu_2O/CuO$ призводить до значного збільшення швидкості її деструкції. Деградація полімерної плівки обумовлена тим, що енергія дисоціації зв'язку С–С більшості полімерів становить близько 350 кДж·моль$^{-1}$, а енергія природних променів знаходиться в межах 400-600 кДж·моль$^{-1}$. Важливим для забезпечення зсуву активності фотокаталізатора у видимий діапазон є забезпечення максимальної гомогенізації всієї реакційної суміші, повне перемішування компонентів між собою. Причиною підвищення втрати маси може бути покращене розділення фотоініційованих носіїв заряду в присутності гетеросистеми $Cu/Cu_2O/CuO$.

Безперечною перевагою мікрочастинок у порівнянні з частинками більшого розміру є максимальна ймовірність виходу розділених зарядів на поверхню каталізатора та мінімальна – їх рекомбінації, відповідно. У зв'язку з тим, що глибина проникнення світла в частинки обмежена, зменшення розмірів частинок до мікророзмірних значень сприяє поглинанню світла у всьому об'ємі $Cu/Cu_2O/CuO$.

Однак слід враховувати й термічний вплив, що проявляється при занадто великих інтервалах часу опромінення. Отже, контрольований час опромінення є важливим параметром експерименту з фотокаталітичної деградації поліетиленових плівок.

Висновки. Досліджено дію гетеросуміші $Cu/Cu_2O/CuO$ на швидкість деградації поліетиленової плівки під впливом сонячного світла експрес-методом. Показано, що зразки плівки з вмістом 3 % суміші при сумарному опроміненні 120 годин продемонстрували втрату маси до 27 %, тоді як для контрольної плівки цей показник становив 2 %. Встановлено, що на ефективність дії фотокаталізатора значно впливають умови його введення в полімерний матеріал, інтенсивність перемішування, концентрація активної фази, а також тривалість опромінення.

Отримані результати свідчать про можливість використання композиції $Cu/Cu_2O/CuO$ як фотокаталізатора для прискорення процесу деструкції поліолефінових матеріалів під впливом сонячного світла. Гетеросистема $Cu/Cu_2O/CuO$ має низку переваг при застосуванні її як фотокаталізатора: низька токсичність, екологічна безпечність, активація випромінюванням видимого діапазону світла, низька вартість та легкодоступність.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію умов синтезу суміші, удосконалення методів її введення в полімерні субстрати та вивчення механізму фотогенерованих процесів, що супроводжують руйнування поліетиленової матриці. Крім того, актуальним завданням є вивчення довгострокової стабільності каталізатора, перспектив його повторного використання та впливу продуктів фотодеструкції на довкілля.

Список використаних джерел

1. Cheneler, D., & Bowen, J. (2013). Degradation of polymer films. *Soft Matter*, 9, 344-358. https://doi.org/10.1039/C2SM26502H.

2. Tan, Y., Cheng, Y., Xu, J., & Wang, H. (2024). Catalytic chemical recycling and upcycling of polyolefin plastics. *Giant, 19*, 100307. https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100307.

3. Seitz, M., & Schröter, S. (2022). Catalytic depolymerization of polyolefinic plastic waste. *Chemie Ingenieur Technik, 94*, 720-726. https://doi.org/10.1002/cite.202100182.

4. Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Wei, D., Wei, Q., & Deng, S. (2023). Novel catalysts in catalytic upcycling of common polymer wastes. *Chemical Engineering Journal*, 144350. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144350.

5. Hassaan, M., El-Nemr, M., Elkatory, M., Ragab, S., Niculescu, V., & Nemr, A. (2023). Review of Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Metal Oxide Nanoparticles. *Topics in Current Chemistry*, 381:31. https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7.

6.Ali, S. S., Qazi, I. A., Arshad, M., Khan, Z., Voice, T. C., & Mehmood, C. T. (2016). Photocatalytic degradation of low-density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *5*, 44-53. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001.

7. Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., Niaz, F., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2021). Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *97*, 111-128. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017.

8. Goodarzi, N., Ashrafi-Peyman, Z., Khani, E., Moshfegh, A. (2023). Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation. *Catalysts, 13(7),* 1102-1158. https://doi.org/10.3390/catal13071102.

9. Zindrou, A., Belles, L., Solakidou, M., Boukos, N., Deligiannakis, V. (2023). Non-graphitized carbon/Cu_2O/CuO nanohybrids with improved stability and enhanced photocatalytic H_2 production. *Scientific Reports*, *13* (1). 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-023-41211-4.

10. Liu, X., Chen, J., Liu, P., Zhang, H., Li, G., An, T., Zhao, H. (2016). Controlled growth of CuO/Cu_2O hollow microsphere composites asefficient visible-light-active photocatalysts. *Applied Catalysis A: General, 521*, 34-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2015.10.005.

11. Pastrián, F., Silva, A., Dourado, A., Batista, A., Oliveira-Filho, A. et all. (2018). Why Could the Nature of Surface Facets Lead to Differences in the Activity and Stability of Cu_2O-Based Electrocatalytic Sensors? *ACS Catalysis*, *8*(7), 6265-6272. https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00726.

12. Khiavi, N., Katal, R., Eshkalak, S. et al. (2019). Visible Light Driven Heterojunction Photocatalyst of CuO–Cu_2O Thin Films for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. *Nanomaterials*, *9*(7), 1011. https://doi.org/10.3390/nano9071011.

13. Li, H., Su, Z., Hu, S., & Yan, Y. (2017). Free-standing and flexible $Cu/Cu_2O/CuO$ heterojunction net: A novel material as cost-effective and easily recycled visible-light photocatalyst. *Appl. Catal. B Environ*., 207, 134-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.013.

14. Xie, J., Zhong, Y., Meng, W., Feng, X., & Zhu, T. (2024). Modulation of Cu/Cu_2O nanoparticles to promote the photocurrent response for light-enhanced pseudocapacitive charge storage. *Materials Advances*, *5*(8), 3173-3176. https://doi.org/10.1039/D4MA00147H.

15. Yang, Y., Xu, D., Wu, Q., & Diao, P. (2016). Cu_2O/CuO Bilayered Composite as a High-E_ciency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction. *Sci. Rep*., 6, 35158 DOI:_10.1038/srep35158.

16. Макєєва, І. С., Смірнов, М. О., & Гайдай, І. О. (2023). Фотокаталізатор на основі купрум оксидів, отриманих електролізом. *Технології та інжиніринг*, *4(15),* 80-88. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.4.8.

17. Nascimento, C., Guardani, R., & Giulietti, M. (1997). Use of Neural Networks in the Analysis of Particle Size Distributions by Laser Diffraction. *Powder Technol., 90*, 89-94.

18. Liu, G., Liao, S., Zhu, D., & Cui, J. (2011). Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2. *Solid State Sciences, 13*(1), 88-94. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.014.

References

1. Cheneler, D., & Bowen, J. (2013). Degradation of polymer films. *Soft Matter*, 9, 344-358. https://doi.org/10.1039/C2SM26502H.

2. Tan, Y., Cheng, Y., Xu, J., & Wang, H. (2024). Catalytic chemical recycling and upcycling of polyolefin plastics. *Giant.* V. 19, 100307. https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100307.

3. Seitz, M., & Schröter, S. (2022). Catalytic depolymerization of polyolefinic plastic waste. *Chem. Ing. Tech*., 94, P. 720-726. https://doi.org/10.1002/cite.202100182.

4. Deng, L., Guo, W., Ngo, H., Zhang, X., Wei, D., Wei, Q., & Deng, S. (2023). Novel catalysts in catalytic upcycling of common polymer wastes. *Chem. Engin. J., 471*, 144350. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144350.

5. Hassaan, M., El-Nemr, M., Elkatory, M., Ragab, S., Niculescu, V., & Nemr, A. (2023). Review of Photocatalytic and Antimicrobial Properties of Metal Oxide Nanoparticles. *Topics in Current Chemistry*, 381, 31. https://doi.org/10.1007/s41061-023-00444-7.

6._Ali, S., Qazi, I, Arshad, M., Khan, Z., Voice, T., & Mehmood, C. (2016). Photocatalytic degradation of low density polyethylene (LDPE) films using titania nanotubes, *Environmental Nanotechnology*, *Monitoring & Management, 5*, 44-53. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.001.

7. Rafiq, A., Ikram, M., Ali, S., Niaz, F., Khan, M., Khan, Q., Maqbool, M (2021) Photocatalytic degradation of dyes using semiconductor photocatalysts to clean industrial water pollution. *J/Ind. Eng. Chem.,* 97, 111-128. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.02.017.

8. Goodarzi, N., Ashrafi-Peyman, Z., Khani, E., Moshfegh, A. (2023). Recent progress on semiconductor heterogeneous photocatalysts in clean energy production and environmental remediation. *Catalysts.* 13(7), P. 1102-1158. https://doi.org/10.3390/catal13071102.

9. Zindrou, A., Belles, L., Solakidou, M., Boukos, N., & Deligiannakis, V. (2023**)**. Non-graphitized carbon/Cu_2O/CuO nanohybrids with improved stability and enhanced photocatalytic H_2 production. *Scientific Reports*, *13*(1), 1-12. https://doi.org/10.1038/s41598-023-41211-4.

10. Liu, X., Chen, J., Liu, P., Zhang, H., Li, G., An, T., Zhao, H. (2016). Controlled growth of CuO/Cu_2O hollow microsphere composites asefficient visible-light-active photocatalysts. *Applied Catalysis A: General.* 521, P. 34-41. http://dx.doi.org/10.1016/j.apcata.2015.10.005.

11. Pastrián, F., Silva, A., Dourado, A., Batista, A., Oliveira-Filho, A. et al. (2018). Why Could the Nature of Surface Facets Lead to Differences in the Activity and Stability of Cu_2O-Based Electrocatalytic Sensors? *ACS Catalysis*, *8*(7), 6265-6272. https://doi.org/10.1021/acscatal.8b00726.

12. Khiavi, N., Katal, R., Eshkalak, S. et al. (2019). Visible Light Driven Heterojunction Photocatalyst of CuO–Cu_2O Thin Films for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. *Nanomaterials*, *9*(7), 1011. https://doi.org/10.3390/nano9071011.

13. Li, H., Su, Z., Hu, S., & Yan, Y. (2017). Free-standing and flexible Cu/Cu_2O/CuO heterojunction net: A novel material as cost-effective and easily recycled visible-light photocatalyst. *Appl. Catal. B Environ*., *207*, 134-142. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.013.

14. Xie, J., Zhong, Y., Meng, W., Feng, X., Zhu, T. (2024). Modulation of Cu/Cu_2O nanoparticles to promote the photocurrent response for light-enhanced pseudocapacitive charge storage. *Materials Advances*, *5*(8), 3173-3176. https://doi.org/10.1039/D4MA00147H.

15. Yang, Y., Xu, D., Wu, Q., & Diao, P. (2016). Cu_2O/CuO Bilayered Composite as a High-E_ciency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction. *Sci. Rep*., *6*, 35158. DOI:_10.1038/srep35158.

16. Makyeyeva, I.S., Smirnov, M. A., & Gaidai, I. A. (2023). Fotokatalizator na osnovi kuprum oksydiv, otrymanykh elektrolizom [The photocatalyst based on copper oxides obtained by electrolysis]. *Tekhnolohii ta inzhynirynh – Technologies and engineering*, 4(15), 80-88. DOI: 10.30857/2786-5371.2023.4.8.

17. Nascimento, C., Guardani, R., & Giulietti, M. (1997). Use of Neural Networks in the Analysis of Particle Size Distributions by Laser Diffraction. *Powder Technol.,* 90, 89-94.

18. Liu, G., Liao, S., Zhu, D., Cui, J. (2011). Solid-phase photocatalytic degradation of polyethylene film with manganese oxide OMS-2. *Solid State Sciences*., (13(1)), 88-94. https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2010.10.014.

Отримано 17.07.2025

UDC 544.4:504

Iryna Makyeyeva[1], Olha Kyslova[2]

[1]PhD, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: makyeyeva.is@knutd.com.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-5672-3097
Researcher ID: X-2580-2018. **SCOPUS Author ID:** 7003994762

[2]Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine
E-mail: kislova.ov@knutd.com.ua. **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0223-1860. **Scopus Author ID:** 22034723000

INFLUENCE OF ELECTROCHEMICALLY SYNTHESIZED MIXTURE Cu/Cu_2O/CuO ON THE DESTRUCTION OF POLYETHYLENE FILM

Photocatalytic degradation of polymeric materials in the presence of oxide material additives is a promising direction to reduce environmental pollution. The electrochemically synthesized composition consisting of Cu/Cu_2O/CuO microparticles is chemically stable. The ability to regulate the electrolysis conditions allows to vary its phase composition and crystal structure.

The study of the mixture influence on the rate of polyethylene film degradation under the sunlight irradiation by express method showed that the best results were demonstrated by samples with a mixture content of 3% under conditions of mechanical mixing and prolonged irradiation. The results obtained indicate the possibility of the Cu/Cu_2O/CuO composition using as a photocatalyst to accelerate the degradation of polyolefin materials under the influence of sunlight. It was established that the efficiency of the photocatalyst is significantly affected by the conditions of its introduction into the polymeric material, the intensity of mixing, the concentration of the active phase, and the duration of irradiation.

The Cu/Cu_2O/CuO heterosystem has a number of advantages when used as a photocatalyst, namely: low toxicity, environmental safety, activation by visible light radiation, low cost and easy availability. Further research is aimed at optimizing the synthesis conditions of the mixture, improving the methods of its introduction into polymer substrates and studying the mechanism of photogenerated processes that accompany the polyethylene film destruction. In addition, it is relevant to study the long-term stability of the catalyst, the prospects for its reuse and the photodegradation products impact on the environment.

Keywords: *photocatalytic degradation; polyethylene film; Cu/Cu_2O/CuO composition; electrochemical methods; environmental protection.*

Fig.: 3. Table: 2. References: 18.

Макєєва І. С., Кислова О. В. Вплив електрохімічно синтезованої суміші Cu/Cu2O/CuO на деструкцію поліетиленової плівки. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 331-338. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-331-338.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-339-344
УДК 664.8.014

Роман Володимирович Косів[1], Богдан Остапович Дзіняк[2]

[1]аспірант кафедри технології органічних продуктів
Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів, Україна)
E-mail: roman.v.kosiv@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-2439-3795

[2]доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології органічних продуктів
Національний університет «Львівська політехніка» (м. Львів, Україна)
E-mail: bohdan.o.dziniak@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-1824-2871

ПЛОДИ ДИКОРОСЛИХ РОСЛИН – ПЕРСПЕКТИВНА СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

На основі проведених експериментальних досліджень визначено органолептичні й фізико-хімічні показники якості дикорослої плодово-ягідної сировини: журавлини, калини, чорноплідної горобини (аронії) та обліпихи. Встановлено, що завдяки високій харчовій цінності, значному вмісту в плодах поліфенолів і вітаміну С, а отже, і високому антиоксидантному потенціалу, доцільним є використання досліджених видів сировини у виробництві функціональних харчових продуктів. Аналіз отриманих результатів показав, що за зменшенням вмісту вітаміну С досліджувану сировину можна розмістити в ряд: аронія – обліпиха – калина – журавлина, а за зменшенням вмісту поліфенолів: аронія – журавлина – обліпиха – калина. Рівень вмісту поліфенольних сполук у досліджених плодах збігався з рівнем вмісту в них вітаміну С.

Ключові слова: *дикорosла плодово-ягідна сировина; журавлина; калина; чорноплідна горобина (аронія); обліпиха; вітамін С; поліфеноли; функціональні харчові продукти.*

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. У нинішній час, коли великого значення у збереженні здоров'я населення надають профілактиці захворювань, передусім серцево-судинних, надзвичайно важливим є пошук нових джерел, зокрема нетрадиційних, та впровадження їх використання в технологіях харчових продуктів. Здебільшого це стосується рослинних матеріалів, які поєднують у своєму складі значні кількості аскорбінової кислоти й високий вміст поліфенольних сполук.

Постановка проблеми. На сьогодні більшою мірою досліджено різноманітні культивовані види рослинної сировини для харчової промисловості, а використання некультивованої сировини мало вивчене.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливе місце серед рослинної сировини посідають дикорослі плоди, набуваючи дедалі більшого значення в терапевтичному, профілактичному й дієтичному харчуванні населення [1], особливо за екстремальних умов його життєдіяльності [2]. Дикорослі плоди є цінним джерелом різноманітних вуглеводів, серед яких – цукри, поліоли, пектинові речовини, клітковина, геміцелюлози [3]. Ягоди слугують постачальниками біоактивних вторинних метаболітів (поліфенолів, ароматичних сполук, летких кислот), що беруть участь у формуванні їх аромату й смаку [4]. Доведено, що антиоксидантні речовини різної хімічної природи (біофлавоноїди, аскорбінова кислота, каротиноїди), що містяться у фруктах і овочах у різних концентраціях, протидіють вільним радикалам в організмі людини [5]. Антиоксиданти біологічного походження, на відміну від синтетичних фармакологічних засобів, легко й органічно залучаються до метаболічних процесів в організмі та не спричиняють небажаних побічних ефектів [6]. Поліфенольні сполуки є вторинними метаболітами рослин і становлять найбільшу групу фотохімічних речовин. Ці сполуки відомі як важливі антиоксиданти, що проявляють антиглікемічну, противірусну, протиракову й протизапальну активність, а також протиалергійні та антимікробні властивості. Вивченню дикорослих плодів, зібраних у різних регіонах світу, присвячено чимало досліджень, зокрема щодо журавлини [7], калини [8], горобини чорноплідної (аронії), обліпихи, шипшини, чорниці, барбарису, суниці [9].

© Р. В. Косів, Б. О. Дзіняк, 2025

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що відомостей про дослідження дикорослої плодово-ягідної сировини, зібраної на території Львівської області, обмаль або вони відсутні, що й спонукало до їх вибору.

Мета статті. Мета роботи – встановити доцільність використання плодів дикорослих рослин як сировини для виробництва харчових продуктів оздоровчо-профілактичного призначення, що сприяють зміцненню імунітету та запобіганню виникнення захворювань, зокрема серцево-судинних, онкологічних, запальних, алергічних, цукрового діабету.

Виклад основного матеріалу дослідження. Об'єктами досліджень були плоди дикорослих журавлини, калини, чорноплідної горобини (аронії) та обліпихи. Плоди збирали вручну рано-вранці в суху погоду на території Львівської області в період їхньої зрілості (вересень-жовтень 2024 року). Здорові плоди, без видимих ознак пошкоджень, збирали в ПЕТ-контейнери, загальною масою плодів на контейнер 250 г. Загалом для кожного виду плодів було зібрано 4 ПЕТ-контейнери.

У дослідженні використано органолептичні й фізико-хімічні методи аналізу. При органолептичному оцінюванні свіжих плодів їх якість характеризували за п'ятьма органолептичними показниками – зовнішнім виглядом, смаком, кольором, станом поверхні й ароматом [10]. Оцінювання органолептичних показників якості здійснювали за п'ятибальною шкалою групою у складі трьох осіб. Результати досліджень органолептичних показників дикорослої плодово-ягідної сировини наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Органолептичні показники досліджуваних зразків дикорослої плодово-ягідної сировини

Показники	**Характеристика показників (бальна оцінка)**			
	журавлина	**аронія**	**калина**	**обліпиха**
Зовнішній вигляд	чисті, свіжі, без дефектів і мікробіологічних ушкоджень, однорідні (5 балів)	чисті, свіжі, без дефектів і мікробіологічних ушкоджень, однорідні (5 балів)	чисті, свіжі, без дефектів і мікробіологічних ушкоджень, однорідні (5 балів)	чисті, свіжі, без дефектів та ушкоджень, 5 % недозрілих (4 бали)
Смак	відсутність стороннього присмаку, ознаки характерні для цього виду (5 балів)	відсутність стороннього присмаку, ознаки характерні для цього виду (5 балів)	відсутність стороннього присмаку, ознаки характерні для цього виду (5 балів)	відсутність стороннього присмаку, ознаки характерні для цього виду (5 балів)
Колір	характерний для цього виду зрілого матеріалу, інтенсивний, насичений (5 балів)	характерний для цього виду зрілого матеріалу, інтенсивний, насичений (5 балів)	характерний для цього виду зрілого матеріалу, інтенсивний, насичений (5 балів)	характерний для цього виду зрілого матеріалу, інтенсивний, насичений (5 балів)
Стан поверхні	чиста, без дефектів та ушкоджень шкідниками, без тріщин і плям, глянцева (5 балів)	чиста, без дефектів та ушкоджень шкідниками, без тріщин і плям, матова (5 балів)	чиста, без дефектів та ушкоджень шкідниками, без тріщин і плям, глянцева (5 балів)	чиста, без дефектів та ушкоджень шкідниками, без тріщин і плям, глянцева (5 балів)
Аромат	відсутність стороннього запаху, аромат властивий цьому виду, насичений, яскраво виражений (5 балів)	відсутність стороннього запаху, аромат властивий цьому виду, насичений, яскраво виражений (5 балів)	відсутність стороннього запаху, аромат властивий цьому виду, насичений, яскраво виражений (5 балів)	відсутність стороннього запаху, аромат властивий цьому виду, насичений, яскраво виражений (5 балів)

Фізико-хімічні показники досліджуваних зразків дикорослої плодово-ягідної сировини визначали за прийнятими в галузі методиками:

- вологість і загальний вміст сухих речовини – термогравіметричним методом, використовуючи автоматичний аналізатор вологості *KERN DBS 60-3*;
- загальну (титровану) кислотність – титриметричним методом у перерахунку на яблучну кислоту;
- величину pH вимірювали за допомогою універсального pH-метра/йонометра *Mettler-Toledo SevenCompact S220*;
- масову частку сухих розчинних речовин (Brix) – рефрактометричним методом за допомогою рефрактометра *ABBE A. Kruss Optronic AR4*;
- вміст редукуючих цукрів – фериціанідним методом;
- вміст вітаміну С – йодометричним методом;
- вміст поліфенолів – фотоелектроколориметричним методом із використанням реактиву Фоліна-Деніса й застосуванням для визначення оптичної густини розчину спектрофотометра *LLG-UNISP*ЕС 2.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що вологість досліджуваних зразків журавлини, аронії й калини змінювалася в нешироком діапазоні – від 74,1 до 85,7 % (рис. 1). Проте для обліпихи був характерний суттєво нижчий вміст вологи в плодах (52,6 %). Це пов'язано з тим, що обліпиха є кісточковим плодом із великою відносною масою кісточки.

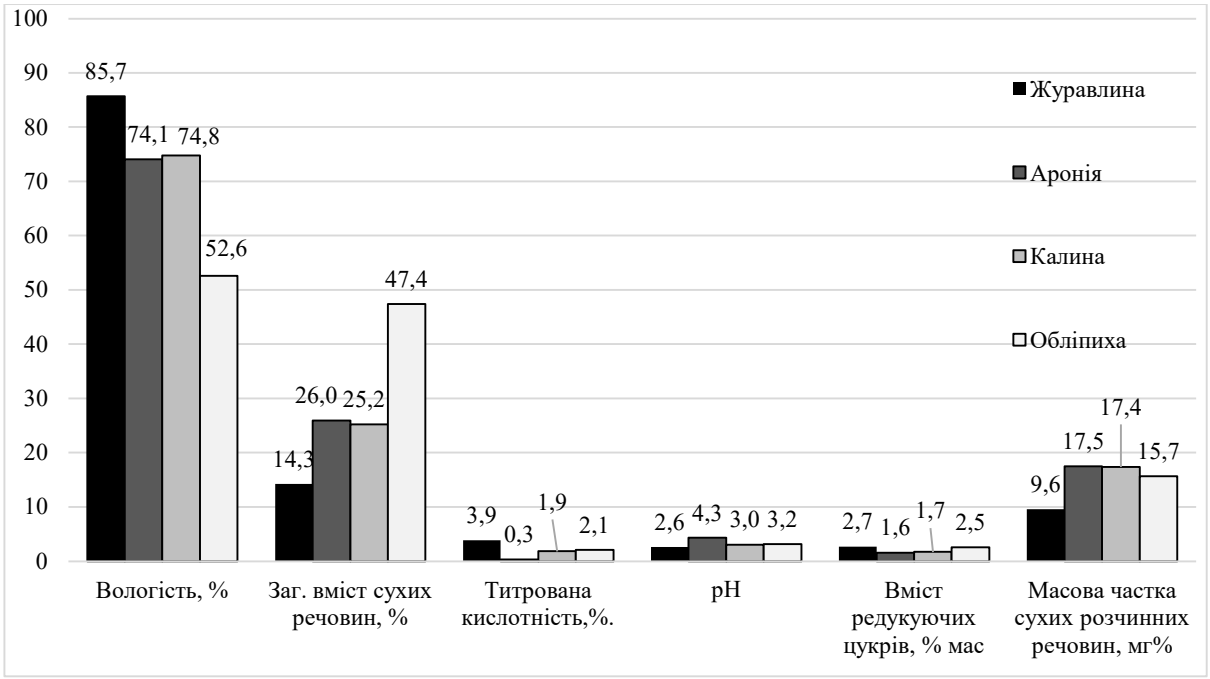


Рис. 1. Фізико-хімічні показники досліджуваних зразків дикорослої плодово-ягідної сировини

Загальний вміст сухих речовин, обернена до показника вологості величина, був близьким для калини й аронії, у журавлині на 45 % нижчим, а в обліписі на 83 % вищим порівняно з аронією (рис. 1), що пояснюється, зокрема, особливостями анатомічної будови плодів.

Плоди аронії суттєво вирізнялися серед інших видів сировини меншим вмістом кислот. Так, її загальна (титрована) кислотність становила 0,3 % у перерахунку на яблучну кислоту, що в 11 разів менше, ніж для журавлини. Для калини й обліпихи ці показники відрізнялися незначно й були вищі від показників аронії в 5,6 і 6,3 раза відповідно. Значення pH досліджених видів сировини було в межах 2,6-4,3 (рис. 1).

Вміст сухих розчинних речовин у досліджуваних зразках плодово-ягідної сировини, визначених за допомогою рефрактометра, становив від 9,6 до 17,5 мг%. Такі розчинні речовини більшою мірою представлені цукрами – переважно сахарозою, глюкозою й фруктозою. Проте отримані дані вказують лише на їх приблизний вміст, оскільки рефрактометр вимірює вміст усіх розчинних речовин, зокрема цукрів, кислот, солей. Вміст редукуючих цукрів у плодах має більше технологічне значення. У плодах редукуючі цукри є основними компонентами вуглеводного комплексу та визначають солодкість, стиглість і якість плодів, енергетичну цінність, потенціал до зброджування. Найвищий вміст редукуючих цукрів був характерний для журавлини й обліпихи – 2,7 і 2,5 % мас. відповідно, що в 1,7 і 1,5 рази вище, ніж в плодах аронії та калини (рис. 1).

Цінними складовими компонентами плодів дикорослої сировини є поліфеноли й вітамін С. Ці речовини є потужними антиоксидантами, що захищають клітини організму від негативного впливу вільних радикалів і підтримують їхні функції в нормі. Встановлено, що найменший вміст вітаміну С серед досліджуваних зразків характерний для журавлини. Його вміст у плодах калини й обліпихи відрізнявся незначно та був більшим на 11 і 31 % відповідно. Вміст поліфенольних сполук у плодах калини й обліпихи був дуже близьким, а в журавлині – на 35 % більшим, ніж у калині (рис. 2). Потрібно зауважити, що суттєво більший вміст аскорбінової кислоти й поліфенолів був характерним для аронії – відповідно у 2,6-3,4 і 1,6-2,1 раза більшим порівняно з іншими видами дослідженої сировини.

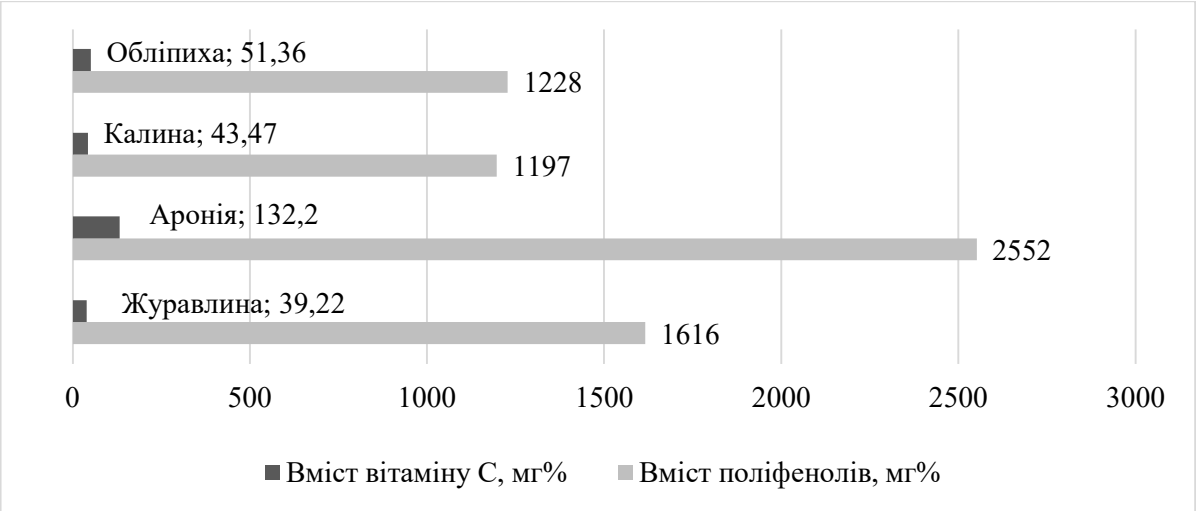


Рис. 2. Вміст вітаміну С і поліфенолів у досліджуваних зразках дикорослої плодово-ягідної сировини

Аналіз отриманих результатів показав, що за зменшенням вмісту вітаміну С досліджувану сировину можна розмістити в ряд: аронія – обліпиха – калина – журавлина, а за зменшенням вмісту поліфенолів: аронія – журавлина – обліпиха – калина. Рівень вмісту поліфенольних сполук у досліджених плодах збігався з рівнем вмісту в них вітаміну С, зокрема для журавлини – 1 616 і 39,22 мг%, для аронії – 2 552 та 132,20 мг% відповідно.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень визначено органолептичні й фізико-хімічні показники якості дикорослої плодово-ягідної сировини: журавлини, калини, чорноплідної горобини (аронії) та обліпихи. Встановлено, що завдяки високій харчовій цінності, значному вмісту в плодах поліфенолів і вітаміну С, а, отже, й високому антиоксидантному потенціалу, доцільним є використання досліджених видів сировини у виробництві функціональних харчових продуктів. Метою подальших досліджень буде пошук ефективних методів зберігання дикорослої плодово-ягідної сировини для максимального збереження у ній цінних біологічно активних речовин.

Список використаних джерел

1. Paredes-López, O., Cervantes-Ceja, M. L., Vigna-Pérez, M., & Hernández-Pérez, T. (2010). Berries: Improving human health and healthy aging, and promoting quality life–a review. *Plant Foods for Human Nutrition*, *65*(3), 299-308. https://doi.org/10.1007/s11130-010-0177-1.

2. Сімахіна, Г., Науменко, Н., & Камінська, С. (2022). Особливості харчування в екстремальних умовах життєдіяльності. *Грааль науки*, (11), 141-146. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.24.12.2021.026.

3. Заморська, І. Л., Волкова, Т. В., & Сасс, А. В. (2020). Інноваційні технології збереження якості замороженої суниці садової для виробництва харчової продукції. *Праці ТДАТУ*, *2*, 202-210.

4. Gu, I., Howard, L., & Lee, S.-O. (2022). Volatiles in berries: Biosynthesis, composition, bioavailability, and health benefits. *Applied Sciences*, *12*(20), 10238. https://doi.org/10.3390/app122010238.

5. Pap, N., Fidelis, M., Azevedo, L., do Carmo, M. A. V., Wang, D., Mocan, A., Pereira, E. P. R., Xavier-Santos, D., Sant'Ana, A. S., Yang, B., & Granato, D. (2021). Berry polyphenols and human health: Evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects. *Current Opinion in Food Science*, *42*, 167-186. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.003.

6. Gundesli, M. A., Korkmaz, N., & Okatan, V. (2019). Polyphenol content and antioxidant capacity of berries: A review. *International Journal of Agriculture, Forestry and Life Sciences, 3*(2), 350-361. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/874337.

7. Ersoy, N., Ercisli, S., & Gundogdu, M. (2017). Evaluation of European Cranberrybush (Viburnum opulus L.) genotypes for agro-morphological, biochemical and bioactive characteristics in Turkey. *Folia Horticulturae*, *29*(2), 181-188. https://doi.org/10.1515/fhort-2017-0017.

8. Polka, D., Podsędek, A., & Koziołkiewicz, M. (2019). Comparison of chemical composition and antioxidant capacity of fruit, flower and bark of viburnum opulus. *Plant Foods for Human Nutrition*, *74*(3), 436-442. https://doi.org/10.1007/s11130-019-00759-1.

9. Carlsen, M. H., Halvorsen, B. L., Holte, K., Bøhn, S. K., Dragland, S., Sampson, L., Willey, C., Senoo, H., Umezono, Y., Sanada, C., Barikmo, I., Berhe, N., Willett, W. C., Phillips, K. M., Jacobs, D. R., & Blomhoff, R. (2010). The total antioxidant content of more than 3100 foods, beverages, spices, herbs and supplements used worldwide. *Nutrition Journal*, *9*(1). https://doi.org/10.1186/1475-2891-9-3.

10. Сімахіна, Г. О., Камінська, С. В., & Науменко, Р. Ю. (2019). Нові підходи до характеристики й оцінювання основних органолептичних показників свіжих і заморожених плодів і ягід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, 30*(69)(1), 72-78. https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a59168c7-3b9b-4d2d-ba62-598f8d15f532/content.

References

1. Paredes-López O., Cervantes-Ceja M.L., Vigna-Pérez M., Hernández-Pérez T. (2010), Berries: Improving human health and healthy aging, and promoting quality life: A review, Plant Foods and Human Nutrition, 65(3), 299-308. https://doi.org/10.1007/s11130-010-0177-1.

2. Simakhina H.O., Naumenko N.V., Kaminska S.V. (2021), Osoblyvosti kharchuvannia v ekstremalnykh umovakh zhyttiediialnosti, [Features of nutrition in extreme living conditions.] *Hraal nauky. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal, – Hraal of science, Inetrnational scientific journal, 11, s. 141-146,* https://doi.org/10.36074/grail-of-science.24.12.2021.026.

3. Zamorska I.L., Volkova T.V., & Sass A.V. (2020). Innovatsiini tekhnolohii zberezhennia yakosti zamorozhenoi sunytsi sadovoi dlia vyrobnytstva kharchovoi produktsii.[Innovative technologies for preserving the quality of frozen garden strawberries for food production.] *Pratsi TDATU – Works of TDATU, 2, 202-210.*

4. Gu I., Howard L., Lee S.O. (2022), Volatiles in berries: Biosynthesis, composition, bioavailability, and health benefits, Appl. Sci. 2022, 12, 10238. https://doi.org/10.3390/app122010238.

5. Pap N., Fidelis M., Azevedo L., do Carmo M.A.V., Wang D., Mocan A., Pereira E.P.R., Xavier-Santos D., SantAna A.S., B. Yang, Granato D. (2021), Berry polyphenols and human health: evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects, Current Opinion in Food Science, 42, pp. 167-186. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.06.003.

6. Gundesli M.A., Korkmaz N., Okatan V. (2019), Polyphenol content and antioxidant capacity of berries: A review, International Journal of Agriculture, Forestry and Life Sciences, 3(2), pp. 350-361. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/874337.

7. Ersoy N., Ercisli S., Gundogdu M., Evaluation of European Cranberrybush (Viburnum opulus L.) genotypes for agro-morphological, biochemical and bioactive characteristics in Turkey, Folia Horticulturae 29/2 (2017), s. 181-188. https://doi.org/10.1515/fhort-2017-0017.

8. Polka D., Podsędek A. & Koziołkiewicz M. Comparison of Chemical Composition and Antioxidant Capacity of Fruit, Flower and Bark of Viburnum opulus. Plant Foods Hum Nutr 74, 436-442 (2019). https://doi.org/10.1007/s11130-019-00759-1.

9. Carlsen MH, Halvorsen BL, Holte K., Bohn SK, Dragland S., Sampson L., Blomhoff R. (2010), The total antioxidant content of more than 3100 foods, beverages, spices, herbs and supplements used worldwide, Nutrition Journal, 9(1). https://doi.org/10.1186/1475-2891-9-3.

10. Simakhina H.O., Kaminska S.V., Naumenko R.Iu. (2019), Novi pidkhody do kharakterystyky y otsiniuvannia osnovnykh orhanoleptychnykh pokaznykiv svizhykh i zamorozhenykh plodiv i yahid. [New approaches to characterising and evaluating the main organoleptic indicators of fresh and frozen fruits and berries.] *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University,* 30 (69), №1, pp. 72-78. https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a59168c7-3b9b-4d2d-ba62-598f8d15f532/content.

Отримано 26.05.2025

UDC 664.8.014

Roman Kosiv[1], Bohdan Dzinyak[2]

[1]PhD Student at the Department of Organic Products Technology
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)
E-mail: roman.v.kosiv@lpnu.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0006-2439-3795

[2]Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Organic Products Technology
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine);
E-mail: bohdan.o.dziniak@lpnu.ua

WILD PLANT FRUITS – A PROMISING RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF FUNCTIONAL FOODS

The aim of this work was to establish the feasibility of using wild plant fruits as raw materials for the production of functional foods.

The objects of research were the fruits of wild cranberries, viburnum, chokeberry (chokeberry) and sea buckthorn. Organoleptic and physicochemical methods of analysis were used in the study. In the organoleptic evaluation of fresh fruits, their quality was characterized by five indicators: appearance, taste, color, surface condition, and aroma. The evaluation was carried out on a five-point scale by a group of three people. Physicochemical methods of analysis were used to determine the following in the raw materials under study vitamin C content by iodometric method, total polyphenol content by photoelectrocolorimetric method using Folin-Dennis reagent, total (titrated) acidity, mass fraction of dry soluble substances (Brix) by refractometric method, content of reducing sugars by ferricyanide method, moisture and total solids content by thermogravimetric method, pH by pH meter.

On the basis of the experimental studies, the organoleptic and physicochemical quality indicators of wild fruit and berry raw materials: cranberries, viburnum, chokeberry (chokeberry) and sea buckthorn were determined. It has been established that due to the high nutritional value, significant content of polyphenols and vitamin C in the fruits, and, consequently, high antioxidant potential, it is advisable to use the studied types of raw materials in the production of functional foods. The analysis of the results showed that, in terms of decreasing vitamin C content, the studied raw materials can be placed in the following order: chokeberry – sea buckthorn – viburnum – cranberry, and in terms of decreasing polyphenol content: chokeberry – cranberry – sea buckthorn – viburnum. The level of polyphenolic compounds in the studied fruits coincided with the level of vitamin C in them.

Key words: *wild fruit and berry raw materials; cranberries; viburnum; chokeberry (chokeberry); sea buckthorn; vitamin C; polyphenols; functional foods.*

Table: 1. Fig.: 2. References: 10.

Косів Р. В., Дзіняк Б. О. Плоди дикорослих рослин – перспективна сировина для виробництва функціональних харчових продуктів. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 339-344. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-339-344.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-345-352
УДК 504.05:658.56:502.1

Сергій Климович Павлюк[1], Ганна Ігорівна Харитоненко[2], Ірина Валеріївна Суха[3]

[1]аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ННІ УДХТУ Українського державного університету науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: serpik07@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7615-963X

[2]кандидат біологічних наук, доцент кафедри промислової фармації Київський національний університет технологій та дизайну (Київ, Україна)
E-mail: anna.kharitonenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9642-5334

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ННІ УДХТУ Українського державного університету науки і технологій (Дніпро, Україна)
E-mail: irinasuha3@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5579-2047

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ, БЕЗПЕЧНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ВТОРИННОГО ПЕТ

У статті висвітлено сучасні підходи до перероблення вторинного поліетилентерефталату (ПЕТ) з урахуванням аспектів забезпечення якості, безпечності та екологічності кінцевої продукції. Показано важливість використання вторинного ПЕТ у контексті сталого розвитку та зменшення впливу на навколишнє середовище. Розглянуто ефективність механічних та хімічних методів очищення, а також проаналізовано токсикологічні ризики, пов'язані з міграцією хімічних сполук у харчові продукти. Узагальнено вимоги міжнародних стандартів до безпечності вторинного ПЕТ, а також наведено переваги впровадження принципів замкнутого циклу у виробництво. Визначено потенційні загрози здоров'ю людини та окреслено шляхи їх зниження на основі сучасних технологій та регуляторних норм.

Ключові слова: *вторинний поліетилентерефталат (ПЕТ); перероблення пластику; механічне очищення; хімія; токсикологічна безпека; контроль міграції; стандарти якості; екологічна безпека; харчова упаковка; екологія людини.*

Табл.: 5. Бібл.: 20.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах виробництва питання якості, безпечності та екологізації матеріалів і продукції стають дедалі важливішими. Це зумовлено зростаючими вимогами споживачів і посиленням законодавчих норм у сфері охорони навколишнього середовища та захисту здоров'я людей. Перероблення та використання вторинного ПЕТ є прикладом поєднання економічних, технологічних та екологічних підходів для створення конкурентоспроможної та безпечної продукції.

Постановка проблеми. Забезпечення високої якості продукції на основі вторинного ПЕТ є однією з основних цілей сучасних виробників. Одним із важливих етапів у процесі переробки ПЕТ є очищення від залишкових забруднень. Сучасні технології дозволяють знижувати рівень домішок до мінімальних значень, що сприяє безпеці матеріалу для повторного використання, зокрема у харчовій промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переробка ПЕТ є ключовим елементом сталого розвитку в умовах зростаючої потреби в екологічно безпечних матеріалах. Останні дослідження показують, що механічна та хімічна переробка ПЕТ є ефективними способами зниження негативного впливу полімерних відходів на довкілля [1-4]. Однією з основних проблем, з якими стикаються виробники, є очищення вторинного ПЕТ від залишкових забруднень, таких як барвники, хімічні речовини та інші домішки, що утворюються в процесі попередньої експлуатації матеріалу. За словами авторів [5-8], використання багатоступеневих фільтраційних систем і хімічних методів очищення дозволяє знизити рівень таких забруднень до мінімальних значень, що робить матеріал безпечним для повторного використання.

Важливим аспектом є контроль за міграцією шкідливих речовин з переробленого ПЕТ в харчові продукти. За даними досліджень, які проведені Європейським агентством з безпеки харчових продуктів (EFSA, 2022), вторинний ПЕТ, що використовується для

© С. К. Павлюк, Г. І. Харитоненко, І. В. Суха, 2025

упаковки харчових продуктів, повинен проходити ретельні перевірки на міграцію хімічних сполук. Ці перевірки необхідні для того, щоб уникнути можливих ризиків для здоров'я споживачів, зокрема через наявність залишкових мономерів, барвників або пластифікаторів, таких як фталати, які можуть негативно впливати на гормональну систему людини [9-11].

Сучасні технології переробки ПЕТ, що наведені в роботах [12-14], сприяють значному зменшенню енергетичних витрат на виробництво нового матеріалу та зменшенню викидів парникових газів. Використання переробленого ПЕТ знижує необхідність у первинних ресурсах та сприяє збереженню природних ресурсів, що є важливим етапом у досягненні цілей сталого розвитку [15-16]. Принципи замкнутого циклу, що активно впроваджуються в процес переробки пластикових матеріалів, дозволять зменшити обсяги відходів і підвищити ефективність використання сировини.

Проте, як зазначено в роботах [17-20], необхідно продовжувати дослідження для оцінки довгострокових токсикологічних ефектів, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ у харчовій промисловості. Це дозволить забезпечити більш точні критерії для безпеки продукції, що виготовляється з переробленого матеріалу.

У цілому, сучасні дослідження підтверджують, що переробка ПЕТ є важливим елементом у напрямку зменшення екологічного навантаження та забезпечення безпечної продукції. Однак, важливо продовжувати вдосконалення технологічних процесів очищення та підвищення вимог до регуляції використання вторинного ПЕТ у харчовій упаковці.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У виробництві вторинного ПЕТ важливе місце займає перевірка його якості за допомогою фізико-хімічних та механічних випробувань. Це включає вимірювання міцності, стійкості до впливу ультрафіолету та агресивних середовищ, а також визначення показників, таких як щільність, в'язкість розплаву і рівень залишкової вологості. Забезпечення стабільної якості дозволяє використовувати вторинний ПЕТ для виготовлення продукції, що відповідає міжнародним стандартам.

Метою роботи є аналіз сучасних підходів до забезпечення якості, безпечності та екологізації виробництва вторинного ПЕТ, а також вивчення його застосування у різних галузях промисловості.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах виробництва питання якості, безпечності та екологізації матеріалів та продукції стають дедалі важливішими. Це обумовлено як зростаючими вимогами з боку споживачів, так і посиленням законодавчих норм у сфері охорони навколишнього середовища та захисту здоров'я людей. Переробка та використання вторинного ПЕТ є яскравим прикладом того, як поєднання економічних, технологічних та екологічних підходів дозволяє створювати конкурентоспроможну та безпечну продукцію.

Забезпечення високої якості продукції на основі вторинного ПЕТ є однією з основних цілей сучасних виробників.

Одним із важливих етапів у процесі переробки ПЕТ є очищення від залишкових забруднень. Сучасні технології дозволяють знижувати рівень домішок до мінімальних значень, що забезпечує безпечність матеріалу для повторного використання, зокрема у харчовій промисловості. За допомогою багатоступеневих систем фільтрації та хімічного очищення видаляються барвники, хімічні речовини та інші забруднювачі, що виникають під час попередньої експлуатації матеріалу якості.

Для зниження рівня забруднень у вторинному ПЕТ використовуються різні методи очищення, порівняння ефективності яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Методи очищення ПЕТ та їхня ефективність щодо видалення забруднень

Метод очищення	Ефективність видалення (%)	Тип забруднень	Переваги	Недоліки
Гаряче промивання + мийні засоби	60-80	Масла, органічні речовини	Простота, недорого	Недостатня для фталатів
Вакуумна дегазація	70-90	Леткі, органічні сполуки	Ефективна для ацетальдегіду	Висока енергозатратність
Екструзія з вакуумом	85-95	ЛОС, фталати	Комбінована технологія	Потребує складного обладнання
Хімічна гідролізна очистка	90-99	Мономери, барвники	Глибоке очищення	Дорогий процес, утворення відходів

Джерело: розроблено авторами.

У виробництві вторинного ПЕТ важливе значення має перевірка його якості за допомогою фізико-хімічних та механічних випробувань. Це включає вимірювання міцності, стійкості до впливу ультрафіолету та агресивних середовищ, а також визначення показників, таких як щільність, в'язкість розплаву і рівень залишкової вологості.

Забезпечення стабільної якості дозволяє використовувати вторинний ПЕТ для виготовлення продукції, що відповідає міжнародним стандартам.

Питання безпечності матеріалів для споживачів є пріоритетним під час використання вторинного ПЕТ, особливо в харчовій та фармацевтичній промисловостях. Регулювання безпеки вторинного ПЕТ у різних країнах має певні відмінності, що вказані в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння стандартів щодо безпеки вторинного ПЕТ у різних регіонах

Параметр	ЄС (EFSA)	США (FDA)	Японія (JHOSPA)
Міграція загальна (SML)	≤ 60 мг/кг	≤ 50 мг/кг	≤ 50 мг/кг
Дозвіл на використання	Після оцінки процесу	Після сертифікації	Після токсикологічного тестування
Оцінка стерильності	Обов'язкова	Обов'язкова	Обов'язкова
Визначення залишкового ПЕТ	≤ 0,2 %	≤ 0,1 %	≤ 0,3 %

Джерело: розроблено авторами.

Існує кілька ключових напрямків забезпечення безпеки.

1. Контроль міграції речовин. Міграція шкідливих хімічних речовин із полімерів у харчові продукти або рідини є основною загрозою для безпеки споживачів. Відповідно до директив Європейського агентства з безпеки харчових продуктів (EFSA), вторинний ПЕТ, що використовується для упаковки, повинен проходити ретельні перевірки на міграцію хімічних речовин, щоб виключити можливі ризики для здоров'я людей.

2. Стерильність і технології очищення при переробленні ПЕТ дозволяють гарантувати високу гігієнічність матеріалу, що робить його безпечним для контакту з харчовими продуктами. Контроль за процесами стерилізації упаковки та матеріалів забезпечує відповідність строгим вимогам у харчовій промисловості та фармацевтиці.

Екологізація виробничих процесів є важливим аспектом використання переробленого ПЕТ у сучасному виробництві.

Вона передбачає кілька підходів.

Зниження викидів: однією з основних екологічних переваг використання вторинного ПЕТ є значне зменшення викидів парникових газів під час його виробництва порівняно з первинним ПЕТ. За даними досліджень, використання перероблених матеріалів дозволяє знизити енергетичні витрати на виробництво до 50 %, а також значно скоротити кількість відходів, що потрапляють на сміттєзвалища.

Замкнутий цикл виробництва: впровадження принципів замкнутого циклу дозволяє значно підвищити екологічність виробництва. Це передбачає постійне повернення відходів виробництва у вигляді сировини для нових циклів виробництва, знижуючи потребу у первинній сировині та мінімізуючи кількість відходів.

Застосування «зелених» технологій: останнім часом більше виробників впроваджують «зелені» технології, що знижують енергоспоживання і використання природних ресурсів. Наприклад, використання сонячної енергії або інших відновлюваних джерел енергії у процесах переробки ПЕТ є ефективним способом зменшити негативний вплив на довкілля.

Сучасні підходи до забезпечення якості, безпеки та екологізації виробництва вторинного ПЕТ свідчать про значний прогрес у цій галузі. Поєднання передових технологій очищення та контролю матеріалів дозволяє отримувати продукцію, яка відповідає найвищим стандартам якості та безпеки. Водночас екологічні підходи до переробки ПЕТ створюють можливості для зниження негативного впливу на навколишнє середовище та ефективного використання ресурсів. Впровадження цих підходів забезпечує сталий розвиток у сфері переробки ПЕТ та його використання у різних галузях промисловості.

Токсикологічні аспекти використання тари для харчових продуктів із вторинного ПЕТ. Використання вторинного ПЕТ для виробництва тари, зокрема для харчових продуктів, викликає певні занепокоєння щодо можливого впливу на здоров'я споживачів. Це пов'язано з ризиком міграції хімічних речовин із полімеру в харчові продукти. Питання токсикологічної безпеки включає оцінку впливу потенційних забруднювачів, таких як залишкові мономери, добавки, домішки або продукти розкладу. Потенційні забруднювачі, які можуть залишатися у вторинному ПЕТ або утворюватися під час його переробки, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Потенційні забруднювачі у вторинному ПЕТ та їхні джерела

Забруднювач	Джерело	Потенційний вплив	Методи усунення
Ацетальдегід	Термічна обробка	Погіршення смаку	Вакуумна дегазація
Фталати	Добавки первинного ПЕТ	Гормональні порушення	Сорбційне очищення
Барвники	Кольорова упаковка	Токсичність, зміна кольору	Сорбція, хімічне очищення
Важкі метали	Попереднє використання	Токсичність	Хелатування, фільтрація

Джерело: розроблено авторами.

Міграція хімічних речовин

Одним з основних ризиків використання вторинного ПЕТ є міграція хімічних речовин із полімерної упаковки в харчові продукти. У процесі переробки ПЕТ може бути забруднений хімічними речовинами, такими як барвники, мастила або фталати, які використовуються у виробництві первинних полімерів. Крім того, під час експлуатації упаковки можливий процес деградації полімеру, що може призвести до утворення низькомолекулярних сполук, які мігрують у продукти харчування.

Відповідно до досліджень, вторинний ПЕТ, що використовується для харчової упаковки, може містити сліди важких металів, летких органічних сполук (ЛОС) або залишкових мономерів. Однією з таких речовин є ацетальдегід, який є побічним продуктом термічної обробки ПЕТ. Хоча його концентрація зазвичай є низькою, тривалий контакт із продуктами харчування може збільшувати його вміст у харчовій продукції.

Токсикологічні характеристики найпоширеніших забруднювачів вторинного ПЕТ подано в табл. 4.

Таблиця 4 – Токсикологічний профіль потенційних забруднювачів вторинного ПЕТ

Речовина	Клас небезпеки (GHS)	Можливий вплив на людину	NOAEL* (мг/кг маси тіла/день)	Джерело
Ацетальдегід	H351 (ймовірно канцероген)	канцерогенність, подразнення	120	WHO
ДЕГ (діетиленгліколь)	H302 (токсичний при ковтанні)	Ниркова токсичність	50	EFSA
Фталати (DEHP)	H360 (репродуктивна токсичність)	Порушення гормонального балансу	37	ECHA
Антимон (Sb)	H373 (токсичний при тривалому впливі)	Гематологічні зміни	6	US EPA

Джерело: розроблено авторами.

*NOAEL – найвища доза, при якій не спостерігається шкідливих ефектів.

Регулювання та безпека

Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) та інші регуляторні органи встановили суворі вимоги щодо використання вторинного ПЕТ для виробництва упаковки для харчових продуктів. Для того щоб вторинний ПЕТ був допущений до використання в контакті з харчовими продуктами, він має відповідати ряду критеріїв:

1) ретельне очищення та процеси деконтамінації: сучасні методи переробки ПЕТ передбачають етапи багаторазового промивання та термічної обробки, що дозволяють видаляти більшість можливих забруднювачів із полімеру.

2) ліміт на міграцію хімічних речовин: регулюючі органи встановлюють допустимі ліміти на міграцію хімічних речовин з упаковки в харчові продукти. Ці ліміти базуються на оцінках ризику для здоров'я людини. Наприклад, максимальний допустимий рівень міграції мономерів із вторинного ПЕТ у харчові продукти становить 60 мг/кг для різних хімічних речовин, включаючи ацетальдегід та фталати.

Перелік ключових міжнародних і національних нормативних документів, що регулюють безпечне використання вторинного ПЕТ, наведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Основні нормативно-технічні документи, що регулюють переробку вторинного ПЕТ

Назва документа	Орган/країна	Основні положення
Regulation (EC) № 282/2008	Європейський Союз	Визначає вимоги до очищення вторинного ПЕТ
21 CFR §177.1630	США (FDA)	Умови безпеки вторинного ПЕТ для харчових цілей
ISO 15270:2008	ISO	Управління відходами полімерних матеріалів
ДСТУ EN 15343:2017	Україна (ДП "УкрНДНЦ")	Трасування та оцінка відповідності ПЕТ

Джерело: розроблено авторами.

Ризики для здоров'я

Одним з основних ризиків, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ для харчової упаковки, є можливість потрапляння до організму людини токсичних речовин, що можуть мати канцерогенні, мутагенні або репродуктивно токсичні властивості.

Дослідження показують, що під час неправильної переробки ПЕТ існує ризик зростання рівнів забруднень. Зокрема, фталати, які часто використовуються як пластифікатори, можуть призвести до гормональних порушень або розвитку ендокринних захворювань.

Іншим можливим джерелом забруднення є леткі органічні сполуки (ЛОС), що виникають під час термічної обробки ПЕТ. Важливо зазначити, що ці речовини можуть мігрувати з упаковки у продукти при підвищених температурах, наприклад, під час нагрівання їжі в пластиковій упаковці.

Крім цього, питання стосуються і міграції наночастинок, які можуть утворюватися під час виробництва вторинного ПЕТ. Попри те, що дослідження в цій сфері ще тривають, потенційний вплив наночастинок на організм людини залишається відкритим питанням.

Методи зниження ризиків

Для зниження ризиків, пов'язаних із використанням вторинного ПЕТ для виготовлення упаковки для харчових продуктів, необхідно застосовувати комплекс заходів, які включають таке.

1. Оптимізація процесів переробки: Забезпечення ретельного очищення ПЕТ перед повторним використанням та використання технологій деконтамінації, таких як багаторазова екструзія та вакуумна обробка.

2. Контроль за якістю: Виробники повинні забезпечувати контроль якості продукції на всіх етапах виробництва для мінімізації забруднень.

3. Дослідження довготривалих ефектів. Подальші дослідження щодо впливу міграції хімічних речовин із вторинного ПЕТ на здоров'я людини дозволять забезпечити більш надійний захист споживачів.

Використання вторинного ПЕТ для упаковки харчових продуктів може мати певні токсикологічні ризики, пов'язані з міграцією хімічних речовин у продукти харчування. Однак за умов дотримання сучасних технологічних стандартів переробки та очищення полімеру ризики можна звести до мінімуму. Регуляторні органи в багатьох країнах встановлюють жорсткі обмеження на міграцію потенційно шкідливих речовин із полімерної упаковки, забезпечуючи безпеку споживачів.

Висновки. Сучасні методи механічної та хімічної переробки дозволяють значно знижувати рівень забруднень у вторинному ПЕТ, що робить його придатним для повторного використання у різних галузях промисловості, зокрема в харчовій.

Одним із ключових аспектів у процесі переробки є ретельне очищення матеріалу від залишкових забруднень. Сучасні технології, такі як багатоступеневі фільтраційні системи та хімічні обробки, допомагають мінімізувати рівень небажаних домішок і забезпечують безпеку матеріалу.

Питання токсичності залишкових хімічних сполук та міграції шкідливих речовин у харчові продукти залишаються актуальними, хоча сучасні методи очищення та регулювання міграції хімічних речовин допомагають мінімізувати ці ризики. Водночас використання вторинного ПЕТ зменшує негативний екологічний вплив завдяки зменшенню витрат енергії та зниженню обсягів відходів.

Вдосконалення технологій очищення та контроль якості продукції із вторинного ПЕТ створює можливості для його подальшого широкого застосування, забезпечуючи відповідність до міжнародних стандартів якості та екологічної безпеки.

Список використаних джерел

1. Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Conversion of waste PET into valuable products. *European Polymer Journal*, *82*, 1-27.

2. Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, *41*(7), 1453-1477. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.

3. Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials, 2*(1), 8. https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8.

4. Buekens, A., & Yang, J. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 16*(3), 415-434. https://doi.org/10.1007/s10163-014-0241-2.

5. Caldicott, R., & Banerjee, S. (2015). Sustainable packaging solutions for the food and beverage industry. *Packaging Technology and Science*, 28 (5), 385-391.

6. Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products, 23*(2), 147-161. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004.

7. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364*(1526), 2115-2126. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311.

8. Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2017). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, *3*(1), 1. https://doi.org/10.3390/recycling3010001.

9. Karayannidis, G. P., & Achilias, D. S. (2007). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, *292*(2), 128-146.

10. Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., … & O'Connor, K. E. (2008). Up-cycling of PET (polyethylene terephthalate) to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Environmental Science & Technology, 42*(20), 7696-7701. https://doi.org/10.1021/es801010e.

11. Kosior, E., & Mitchell, J. (2000). Recycling of PET: a discussion of feedstock, chemical and mechanical recycling. *Polymer Degradation and Stability*, *68*(1), 33-39.

12. Lackner, M. (2015). Bioplastics. *Kunststoffe International*, *10*, 84-86.

13. Lopez, J., Giró-Vega, M., & Vilaplana, F. (2020). Quality assessment of recycled PET flakes obtained from post-consumer bottles by means of solid-state 13C NMR spectroscopy. *Polymer Testing*, *86*, 106478.

14. Maga, D., Hiebel, M., & Thonemann, N. (2019). Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. *Resources, Conservation and Recycling*, *149*, 86-96.

15. Papaspyrides, C. D., & Papaspyrides, C. D. (Eds.). (2019). *Plastics in the Environment*. Elsevier.

16. Pivnenko, K., Eriksen, M. K., Martín-Fernández, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, *54*, 44-52.

17. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, *69*, 24-58.

18. Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(1), 34-52.

19. Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, *115*, 409-422.

20. Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling–An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(11), 865-875.

References

1. Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. (2016). Conversion of waste PET into valuable products. *European Polymer Journal*, *82*, 1-27.

2. Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, *41*(7), 1453-1477. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005.

3. Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in Biomaterials, 2*(1), 8. https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8.

4. Buekens, A., & Yang, J. (2014). Recycling of WEEE plastics: A review. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 16*(3), 415-434. https://doi.org/10.1007/s10163-014-0241-2.

5. Caldicott, R., & Banerjee, S. (2015). Sustainable packaging solutions for the food and beverage industry. *Packaging Technology and Science*, 28 (5), 385-391.

6. Davis, G., & Song, J. H. (2006). Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management. *Industrial Crops and Products, 23*(2), 147-161. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.05.004.

7. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364*(1526), 2115-2126. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311.

8. Kaiser, K., Schmid, M., & Schlummer, M. (2017). Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. *Recycling*, *3*(1), 1. https://doi.org/10.3390/recycling3010001.

9. Karayannidis, G. P., & Achilias, D. S. (2007). Chemical recycling of poly(ethylene terephthalate). *Macromolecular Materials and Engineering*, *292*(2), 128-146.

10. Kenny, S. T., Runic, J. N., Kaminsky, W., Woods, T., Babu, R. P., Keely, C. M., … & O'Connor, K. E. (2008). Up-cycling of PET (polyethylene terephthalate) to the biodegradable polymer polyhydroxyalkanoate. *Environmental Science & Technology, 42*(20), 7696-7701. https://doi.org/10.1021/es801010e.

11. Kosior, E., & Mitchell, J. (2000). Recycling of PET: a discussion of feedstock, chemical and mechanical recycling. *Polymer Degradation and Stability*, *68*(1), 33-39.

12. Lackner, M. (2015). Bioplastics. *Kunststoffe International*, *10*, 84-86.

13. Lopez, J., Giró-Vega, M., & Vilaplana, F. (2020). Quality assessment of recycled PET flakes obtained from post-consumer bottles by means of solid-state 13C NMR spectroscopy. *Polymer Testing*, *86*, 106478.

14. Maga, D., Hiebel, M., & Thonemann, N. (2019). Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid. *Resources, Conservation and Recycling*, *149*, 86-96.

15. Papaspyrides, C. D., & Papaspyrides, C. D. (Eds.). (2019). *Plastics in the Environment*. Elsevier.

16. Pivnenko, K., Eriksen, M. K., Martín-Fernández, J. A., Eriksson, E., & Astrup, T. F. (2016). Recycling of plastic waste: presence of phthalates in plastics from households and industry. *Waste Management*, *54*, 44-52.

17. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, *69*, 24-58.

18. Shen, L., Worrell, E., & Patel, M. K. (2010). Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(1), 34-52.

19. Singh, N., Hui, D., Singh, R., Ahuja, I. P. S., Feo, L., & Fraternali, F. (2017). Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications. *Composites Part B: Engineering*, *115*, 409-422.

20. Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling–An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(11), 865-875.

Отримано 18.07.2025

UDC 504.05:658.56:502.1

Serhii Pavliuk[1], Hanna Kharytonenko[2], Iryna Sukha[3]

[1]PhD Student, Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Technology
Educational and Scientific Institute of UDCTU at the Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: serpik07@ukr.net. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0004-7615-963X

[2]PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anna.kharitonenko@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-9642-5334

[3]PhD in Technical Sciences,
Associate Professor, Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Technology
Educational and Scientific Institute of UDCTU at the Ukrainian State University of Science and Technology (Dnipro, Ukraine)
E-mail: irinasuha3@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-5579-2047

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO ENSURING QUALITY, SAFETY, AND ECO-FRIENDLINESS IN SECONDARY PET PRODUCTION

In the context of escalating global environmental issues and increasing quality and safety requirements for food products, the effective use of recycled polyethylene terephthalate (PET) is becoming highly relevant. Recycling polymer waste is considered an important tool for sustainable development that combines economic efficiency, resource conservation, and environmental responsibility. This raises the need to develop and improve technologies that ensure the safety of recycled materials used in the food industry.

The aim of the study is a comprehensive analysis of modern approaches to ensuring the quality, safety, and environmental sustainability of recycled PET, particularly in its application for food packaging. The paper presents a comparative evaluation of PET purification technologies, including mechanical methods, vacuum degassing, vacuum extrusion, and chemical hydrolysis. The effectiveness of each method in removing contaminants such as phthalates, dyes, volatile organic compounds, monomers, and heavy metals is analyzed. Special attention is paid to toxicological risks associated with the migration of chemical substances into food products

The article outlines international regulatory requirements (EFSA, FDA, JHOSPA) governing the use of recycled PET in food contact applications, with emphasis on permissible migration limits, sterilization assessments, and residual contaminant control. The advantages of closed-loop production and the implementation of "green technologies" that reduce greenhouse gas emissions, energy consumption, and waste volumes are highlighted. The study confirms that, with proper purification, quality control, and compliance with international standards, recycled PET can be safe and efficient for reuse in food-related applications.

It is concluded that the use of advanced PET recycling technologies supports the transition toward an environmentally responsible production model. Future research should focus on long-term toxicological impacts and improving assessment methods for the safety of recycled polymeric materials.

Keywords: *recycled polyethylene terephthalate (PET); plastic recycling; mechanical purification; chemistry; toxicological safety; migration control; quality standards; environmental safety; food packaging; human ecology.*

Table: 5. References: 20.

Павлюк С. К., Харитоненко Г. І., Суха І. В. Аналіз сучасних підходів до забезпечення якості, безпечності та екологізації виробництва вторинного ПЕТ.. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 345-352. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-345-352.

DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-353-363
УДК 543.3

Юлія Артемівна Хежун[1], Ірина Володимирівна Косогіна[2], Олексій Володимирович Косогін[3]

[1]бакалавр кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: juliakhezhun@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-2551-0224

[2]кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: kosoginairyna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9795-7110
Researcher ID: I-3714-2018. **SCOPUS Author ID:** 57220265618

[3]кандидат технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.kosogin@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8379-9580
Researcher ID: I-3040-2018. **SCOPUS Author ID:** 55463712800

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛ ПИТНОЇ ВОДИ В УКРАЇНІ

Здійснено аналіз впливу військових дій на прісноводні ресурси та водну інфраструктуру. Визначено характер впливу і негативні наслідки для якості ресурсів прісної води для населення. Результати аналізу показали, що багато водних споруд, таких як дамби на водосховищах, системи водопостачання та очищення води та підземні шахти, постраждали або знаходяться під загрозою військових дій. Продовження війни матиме численні негативні наслідки для сталого розвитку не лише в Україні, але й у глобальному масштабі, перешкоджаючи досягненню цілей політики «чистої води» та забезпеченню санітарії, збереженню та сталому використанню водних ресурсів, а також енергетичній та продовольчій безпеці. Розроблено інтерактивну карту WaterData, яка містить інформацію про якість води в криницях України у регіонах, які розташовані за руслом р. Дніпро. Встановлено, що якість води в Україні погіршується за такими показниками, як забарвленість, каламутність, жорсткість та вміст сполук заліза, марганцю і нітратів.

Ключові слова: *вода; моніторинг; показники якості води; інтерактивна карта; стан водної інфраструктури.*
Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Прісна вода як ресурс і, відповідно, водна інфраструктура є одними з найбільш вразливих секторів під час надзвичайних та воєнних станів. Перебіг в Україні тривалої війни потребує підвищеної уваги до ролі води як рушійної сили конфліктів та до впливу збройних конфліктів на воду та системи водопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Водні ресурси належать до національних надбань кожної країни, які забезпечують усі сфери життєдіяльності людини, визначають можливості розвитку промисловості та сільського господарства. Площа поверхневих прісних водойм (річки, озера, водосховища, ставки, канали) України становить 21,1 тис.км^2 або 4 % території країни [1]. Враховуючи різні типи природно-кліматичних умов регіонів України, проблема водопостачання зазвичай вирішується шляхом територіального та сезонного перерозподілу водних ресурсів. Значну роль у забезпеченні водними ресурсами маловодних регіонів відіграють великі державні магістральні канали складного призначення, які щорічно постачають близько 3 млрд м^3 води [1]. В Україні побудовано 1103 водосховища загальним об'ємом понад 55 млрд м^3, близько 49 000 ставків, 7 великих каналів загальною протяжністю 1021 км і 10 водопроводів великого діаметра, які постачають воду в маловодні райони країни [1].

Ведення бойових дій на значній території України означає, що її водні ресурси, особливо в південних регіонах з низьким рівнем водопостачання, а також у східних регіонах з великим навантаженням промисловості на водні ресурси, зазнають значної шкоди.

До наслідків бойових дій, які можуть спричинити екологічну катастрофу у сфері водних ресурсів України, можна віднести: хімічне забруднення поверхневих водойм та підземних вод у результаті ведення бойових дій, порушення процесу водопостачання населення

© Ю. А. Хежун, І. В. Косогіна, О. В. Косогін, 2025

та підприємств через руйнування критичної інфраструктури та потрапляння стічних вод у водні об'єкти в результаті порушення роботи каналізаційних очисних споруд [2].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Оцінити поточний рівень витоку стічних вод у ґрунт та ґрунтові води по всій території України неможливо, як і не вдасться це зробити до завершення війни. Постійно порушується цілісність каналізаційних систем та трубопроводів в районах обстрілів на прифронтовій території Донецької, Луганської, Запорізької, Миколаївської та Херсонської областей. Порушення електропостачання через обстріли призводить до неправильної роботи обладнання та насосів, які подають воду на очисні споруди, і переривається насичення води киснем, необхідного для очищення в аеротенках (етап біологічного очищення води).

Окрім механічного руйнування очисних споруд, існує проблема забезпечення станцій необхідними реагентами. Переважно на деяких етапах очищення води використовується хлор і хлорне вапно, але частіше за все для фізико-хімічного очищення стічних вод використовуються реагентні методи з набором традиційних коагулянтів $Al_2(SO_4)_3$, $FeSO_4$, CaO. На жаль, постачання необхідних хімічних реагентів було поставлено на паузу після окупації частини української території, тому оцінити якість сервісу, який надають очисні споруди на тимчасово окупованих територіях, неможливо.

Загалом ситуація з водопостачанням східних областей України залишається дуже складною. Військові дії спричиняють хімічне забруднення поверхневих водойм та підземних вод. Масове затоплення військової техніки і боєприпасів у водоймах, витоки нафтопродуктів та інших хімічних сполук у результаті руйнування великих промислових об'єктів, біологічне забруднення через велике скупчення трупів людей і тварин можна розцінювати як найбільш серйозні джерела забруднення.

Усі види затопленої бойової техніки створюють значне забруднення водних об'єктів сполуками металів. У міру того як тонни сталі піддаються корозії, водойми перенасичуються іонами металів, що отруюють водні екосистеми. Хімічні сполуки, потрапляючи у воду, швидко зв'язуються з епітеліальними структурами гідробіонтів, стають біодоступними й легко проникають через клітинні мембрани, порушуючи їх функціонування. Біоакумуляція феруму може становити потенційну небезпеку, навіть якщо концентрація металу у воді зростає не значно.

Також кожна одиниця затопленої військової техніки викидає десятки та сотні літрів нафтопродуктів, які використовуються для її роботи: дизельне пальне, бензин, мастило та інші суміші надзвичайно токсичних вуглеводнів, які потрапляючи у воду можуть піддаватися окисненню, емульгуванню, осадженню та асиміляції водними організмами.

Велика частина водної інфраструктури розташована в південній і східній частинах країни, районах з інтенсивним сільськогосподарським виробництвом і великими промисловими підприємствами з металообробки, гірничої промисловості та хімічного виробництва, які особливо зазнали негативних впливів під час війни. Зафіксовано підвищення рівня забруднених шахтних вод із високими концентраціями сульфатів, хлоридів і важких металів, які з часом потрапляють в ґрунтові та поверхневі води [3].

Негативний вплив війни також фіксується на прісноводні ресурси та водну інфраструктуру в західних областях України, які далеко від активних наземних військових дій. Наприклад, ракетний обстріл на нафтобазу у Львові призвів до забруднення річки Західний Буг, притоки річки Нарва (басейн річки Вісла). На півночі Тернопільської області внаслідок обстрілів пошкоджено шість резервуарів із мінеральними добривами, що спричинило забруднення річки Іква, притоки річки Стир (басейн Дніпра). Це призвело до значного підвищення концентрації аміаку та нітратів, що своєю чергою викликало масову загибель риби [4].

Руйнування Каховського водосховища призвело до порушення забезпечення навколишніх сільськогосподарських регіонів зрошувальною водою [2]. До війни близько 5840 км^2 орних земель по обидва боки Дніпра потенційно могли обслуговуватися зрошувальними каналами, причому більша частина площі залежало від зрошувальних систем [5].

Уся територія України наразі забруднена військовими відходами, які включають паливо, ракетне паливо, таке як гідразин, азотну кислоту, вибухові речовини типу гексоген, а також боєприпаси, що містять сліди важких металів, ртуть (з фульмінату ртуті), свинець, сурму, миш'як, стронцій, азбест, гільзи для боєприпасів та інші види відходів [5].

Таким чином, можна стверджувати, що під час повені хімічні речовини та біологічні агенти можуть потрапляти у ґрунтові води, тим самим забруднюючи воду в криницях та свердловинах [6].

Окремої уваги заслуговує створення системи інформування населення щодо стану якості води, яка використовується для пиття. Доступ до інформації про стан джерел у зв'язку із військовими діями дещо обмежений як через недостатню поінформованість населення про існування таких даних на офіційних сайтах станцій водопідготовки та водоочищення, так і складністю оновлення даних на існуючих інформаційних порталах.

Розв'язанням такої проблеми може бути забезпечення населення портативними приладами для проведення аналізу якості води в польових умовах, що вимагає як достатньо високого рівня підготовленості виконавців, так і наявності таких портативних польових приладів, асортимент яких на ринку обмежений. Іншим варіантом рішення може бути інформаційне забезпечення населення шляхом створення сайтів з актуальною інформацією або мобільних застосунків з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом. Наповненням інформаційної бази можуть займатись не лише акредитовані лабораторії та установи, але і громадські організації [7], які мають відповідний рівень компетентності та доступ до такої інформації.

Метою цієї роботи є аналіз даних якості води в Україні, спираючись на відкриті дані (поверхнева вода, вода криниць та свердловин), аналіз води криниць населених пунктів, які розташовані вздовж русла р. Дніпро, та розробка інтерактивної карти якості води на відкритій платформі, яка буде доступна для кінцевого споживача.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг якості питної води з різних джерел водопостачання (водопровід, свердловини, колодязі) по всій території України, де наразі це можливо, здійснено в рамках проєкту «Безпечна питна вода в Україні: доступ до інформації про якість води та методи водопідготовки» за фінансування Фінського Фонду Місцевого Співробітництва Посольства Фінляндії в Україні під керівництвом громадської організації «Всеукраїнське водне товариство «Вотернет» (ГО «ВУВТ «Вотернет») [8].

Аналіз води здійснювався акредитованою Лабораторією іонного обміну та адсорбції хіміко-технологічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського (Свідоцтво № ПТ-191/23 від 29.05.2023 р., ДП «Укрметртестстандарт») за індикаторними показниками, які є маркерами відповідності якості водопровідної води згідно з нормами ДСанПіН 2.2.4-171-10 [9].

Починаючи з 2023 року, на основі аналізу даних, отриманих у рамках проєкту «Безпечна питна вода в Україні: доступ до інформації про якість води та методи водопідготовки», встановлено, що воєнні дії призвели до погіршення якості води в різних регіонах України, особливо тих, які використовують для водозабору воду річок [10]. За результатами проведеного моніторингу впродовж 2023-2024 років ГО «ВУВТ «Вотернет» розроблена онлайн-карта якості води України, яка є зручним інструментом для візуалізації отриманих результатів [11].

Статистична інформація, отримана ГО «ВУВТ «Вотернет» у межах моніторингу якості води в Україні, охоплює часовий період з початку 2023 року до серпня 2024 року. Всього в рамках проєкту здійснено аналіз понад 2000 проб води з різних джерел (водопровідна вода, вода з криниць та свердловин) [11].

Детальну інформацію про кількість проб, частку проб води, якість якої не відповідає нормативу у 2021 та 2023-2024 роках залежно від джерела, наведено у статті за авторства Ю. Бережної та Ю. Дрікера [12].

Аналізуючи наявну інформацію, можна виокремити кілька показників, за якими найчастіше спостерігалось перевищення нормативу в більшості досліджуваних проб води. Зокрема, це перманганатна окиснюваність, мгO_2/дм^3; забарвленість, градуси; каламутність, мг/дм^3; сухий залишок, мг/дм^3; вміст сполук заліза, мг/дм^3; сполук мангану, мг/дм^3 та нітратів, мг/дм^3.

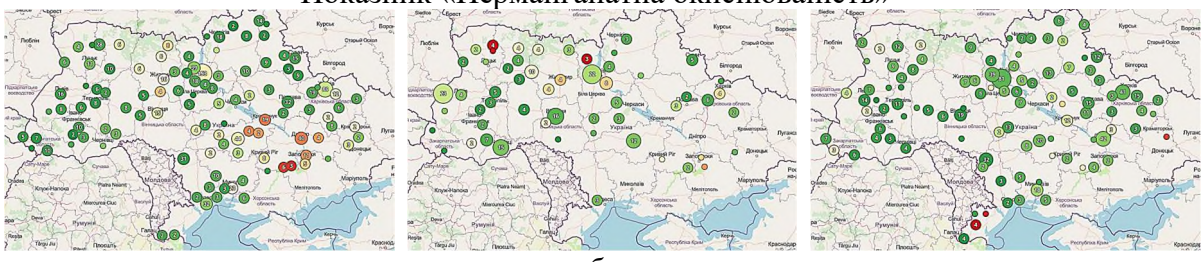
Забарвленість води зазвичай зумовлена наявністю у воді органічних сполук природного та синтетичного походження. Забарвленість поверхневої води, яка є, зазвичай, джерелом водозабору для отримання водопровідної води, вища, ніж води з підземних джерел (криниці, свердловини). Така відмінність зумовлена більшим вмістом гумінових речовин, які вимиваються з ґрунтів вздовж берегів річок та озер і розчиняються у воді, надаючи їй жовтуватого відтінку. Забарвленість підземних вод більше пов'язана з наявністю у воді розчинних сполук заліза та мангану, які при контакті з киснем повітря при «підйомі» води на поверхню перетворюються на малорозчинні сполуки, що надає воді підвищеної каламутності. Окрім того, підвищений вміст заліза у воді може бути пов'язаний з потраплянням у воду продуктів корозії військової техніки, затопленого обладнання та руйнування металевих конструкцій.

З початком війни в Україні спостерігається підвищення вмісту різних розчинних солей (зростає солевміст), що призводить до зростання такого показника, як «сухий залишок, мг/дм^3». Варто зазначити, що на півдні країни спостерігається тенденція до підвищення загальної жорсткості води через підвищений вміст солей кальцію та магнію, і як результат, при нагріванні такої води на поверхнях теплонагрівачів утворюється шар накипу, який необхідно видаляти.

Окремої уваги заслуговує такий показник якості води, як вміст нітратів, оскільки підвищений їх вміст у воді може спостерігатись не тільки в результаті вимивання залишків добрив із сільськогосподарських угідь, а й унаслідок руйнування складів для зберігання добрив у результаті обстрілів або через потрапляння продуктів гідролізу чи інших хімічних перетворень компонентів ракетного палива та вибухових речовин.

На рисунках 1 та 2 наведено точки відбору проб (міста і населені пункти) та їх кількість на кожен визначений показник, при цьому колір точки відбору вказує на значення показника відносно нормативу ДСанПіН (зелений – нижче нормативу, червоний – вище).

Показник «Перманганатна окиснюваність»



а *б* *в*

Показник «Забарвленість»



а *б* *в*



Рис. 1. Моніторинг якості води за різними показниками з різних джерел: а – водопровідна вода; б – вода з криниці; в – вода зі свердловини

Аналіз наведеної інформації дозволяє виділити наступні факти: за показником перманганатна окиснюваність спостерігається перевищення нормативу у водопровідній воді (рис. 1, *а*), джерелом водозабору для якої слугують води річок України, зокрема р. Дніпро та р. Дністер. У свердловинній воді практично не спостерігається перевищення значення перманганатної окиснюваності, окрім зразків води з Одеської області, де значення показника в м. Холмське склало 7,7 мгO_2/дм^3, м. Делень – 8,5 мгO_2/дм^3, м. Главані – 9,6 мгO_2/дм^3, а в місті Задунаївка досягло рекордного перевищення 20,90 мгO_2/дм^3 при нормативі ДСанПіН 2.2.4-171-10 до 5 мгO_2/дм^3. Суттєве перевищення значень перманганатної окиснюваності може свідчити про перебіг таких процесів у воді, як гниття, та про наявність у воді органічних сполук антропогенного походження.

Аналізуючи показник забарвленості водопровідної води, можна помітити, що спостерігається його перевищення у населених пунктах, де основним джерелом водозабору є річка Дніпро (рис. 1, *а*). Так, наприклад, в м. Кременчук Полтавської області забарвленість водопровідної води в крані у споживача коливається в межах від 36 до 52 градусів залежно від точки відбору при нормативі ДСанПіН 2.2.4-171-10 – 20 градусів. Аналізуючи результати отриманих даних проб води в Запорізькій області, наприклад, у м. Петро-Михайлівка, можна помітити значне перевищення цього показника – забарвленість води коливається від 34 до 54 градусів; у Дніпропетровській області, м. Олексіївка – від 37 до 52 градусів, у м. Нікополь – до 47 градусів. У північних регіонах України перевищення за показником забарвленість спостерігається у Рівненській області, зокрема в м. Чудель забарвленість води сягає до 78 градусів.

Перевищення нормативів за показником «Забарвленість» у воді з криниць (рис. 1, *б*) характерне для північних, центральних та східних регіонів: Харківська область, м. Південне – 34 градуси; м. Подвірки – 67 градусів. У центральних регіонах перевищення нормативу за показником забарвленість зафіксовано у м. Бориспіль, Київська область – від 56 до 91 градуса, м. Іванків, Київська обл. – до 138 градусів, а в Житомирській області в м. Оліївка забарвленість води коливається від 41 до 148 градусів.

У північних регіонах України в м. Чудель Рівненської обл. забарвленість води склала 44-58 градусів, у Волинській обл., м. Северинівка – 71 градус, м. Оконськ – 122 градуси, а в м. Карасин досягла рекордного значення у 240 градусів.

Забарвленість у воді свердловин у більшості проб води відповідає нормативу (рис. 1, *в*). Перевищення зафіксовані в пробах води, які відібрані в Одеській обл.: м. Холмське – 70 градусів; м. Задунаївка – 152 градуси; м. Делень – 116 градусів; м. Главані – 90 градусів.

На півночі України в м. Ковель (Волинська обл.) значення показника забарвленість коливається від 17 до 70 градусів.

Отже, для зниження показника забарвленість води до нормативних значень кінцевому споживачу необхідно використовувати локальні методи доочищення води, наприклад, використовувати фільтраційні системи з активованим вугіллям.

Щодо перевищення вмісту нітратів, то майже половина проб води з криниць не відповідають нормативу. Так, наприклад, у м. Вінниця вміст нітратів коливається від 122 до 365 мг/л, в м. Зарванці – від 58 до 100 мг/л. Подібна ситуація спостерігається і в інших областях України: в Івано-Франківській обл., м. Гвіздець вміст нітратів складає 109-153 мг/л; м. Борщів – до 315 мг/л; в Черкаській обл., м. В'язівок – коливається у межах 331-500 мг/л; у Полтавській обл. перевищення нормативу зафіксовано в м. Решетилівка, де вміст нітратів у зразках криничної води досягає 146 мг/л; у Харківській обл., м. Шевелівка – 244-305 мг/л; у Одеській обл. м. Секретарівка – до 365 мг/л.

У воді зі свердловин зустрічаються поодинокі випадки перевищення нормативів за нітратами, наприклад, у Львівській обл., м. Любин – до 127 мг/дм^3, у Запорізькій обл., м. Новоолександрівка – 160 мг/л, у Кіровоградській обл., м. Садки – 197 мг/л.

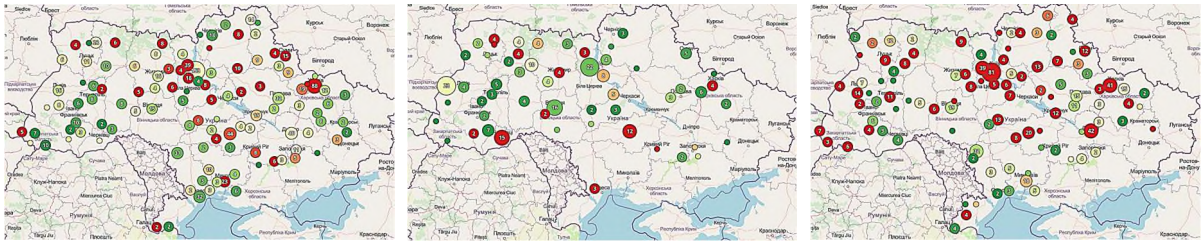
За показником каламутність (рис. 1) перевищення спостерігається у більшості досліджених зразків незалежно від джерела води, тому воду перед споживанням потрібно піддавати очищенню на механічних фільтрах.

Аналізуючи дані якості води за показником «вміст заліза», можна зробити висновок, що у зразках водопровідної води (рис. 2, *а*) перевищений вміст заліза спостерігається у зразках води Київської області – зафіксовано максимальний вміст заліза до 5,13 мг/л, у Сумській обл. – до 11,96 мг/л, у Чернігівській, Харківській та Черкаській областях спостерігається перевищення нормативу на вміст заліза до 1,36 мг/л, до 1,1 мг/л та до 2,19 мг/л відповідно. Практично не зафіксовано перевищень нормативу вмісту заліза в зразках води на заході України, що може бути пов'язано із менш інтенсивними обстрілами цих регіонів у аналізований період.

У воді криниць перевищений вміст заліза спостерігається в Чернівецькій обл. – до 6,29 мг/л, Кіровоградській обл. – до 1,99 мг/л, Волинській обл. – до 1,94 мг/л та Харківській обл. – до 3,11 мг/л.

У більшості проб зі свердловин спостерігається перевищення вмісту заліза, особливо у Київській, Харківській, Чернігівській, Кіровоградській та Львівській областях. Подібна ситуація спостерігається і для підвищеного вмісту сполук марганцю, які дуже часто є супутніми до сполук заліза. Варто зазначити, що основною причиною підвищеного вмісту заліза та марганцю у свердловинній воді є розташування водоносного горизонту та розчинення природних мінералів.

Вміст заліза



а *б* *в*

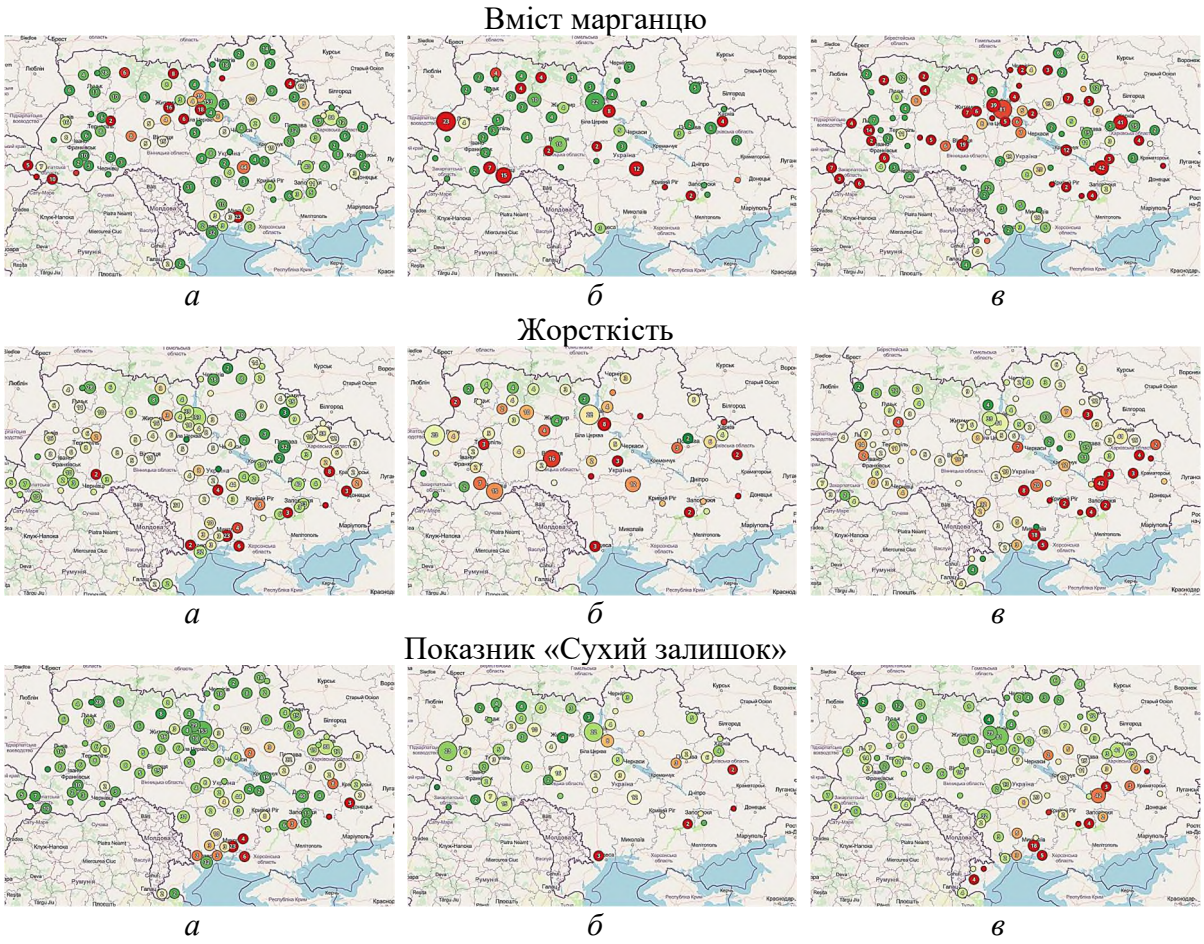


Рисунок 2. Моніторинг якості води за різними показниками з різних джерел: а – водопровідна вода; б – вода з криниці; в – вода зі свердловини

Щодо солевмісту та жорсткості води (рис. 2) спостерігається динаміка зі збільшенням розчинних солей у воді південних регіонів України, особливо для води зі свердловин. Найбільше страждає від відсутності вільного доступу до прісної води населення Одеської обл. (солевміст води коливається від 2405 до 4229 мг/л при нормі 1000 мг/л), Миколаївської обл. – 3720-6670 мг/л та Запорізької обл. – 1534-4452 мг/л.

Що стосується солей кальцію та магнію, які зумовлюють жорсткість води, то найбільша кількість зразків води із перевищеним вмістом за даним показником притаманна воді зі свердловин на півдні України, особливо Миколаївської (24,4-57,2 мг-екв/л) та Запорізької (19,6-36,4 мг-екв/л) областей, Дніпропетровської обл. (9,04-40,4 мг-екв/л) та сходу України, зокрема, в Харківській області загальна жорсткість досягає значень 11,92-27,60 мг-екв/л.

Перевищений вміст солей жорсткості в криничній воді притаманний у Вінницькій обл. (до 17,12 мг-екв/л), Київській обл. (м. Бориспіль – 21,40 мг-екв/л, м. Обухів – 22,20 мг-екв/л), Харківській обл. (до 23,8 мг-екв/л).

У водопровідній воді перевищений вміст солей жорсткості зафіксований в Одеській обл. – до 32,0 мг-екв/л, в Дніпропетровській обл., м. Марганець – до 53,0 мг-екв/л, в Харківській обл. – до 23,40 мг-екв/л.

Отже, аналізуючи отримані дані, можна зробити висновок про негативний вплив воєнних дій на якість води. В той час, як у містах за наявності станцій централізованої чи локальної водопідготовки вдається дещо зменшити негативний вплив наслідків воєнних

дій на якість води та привести її показники якості до нормативних вимог, у більш віддалених регіонах або за відсутності нормальної роботи систем водопостачання основним джерелом води виступають колодязі та свердловини. Саме тому особливу увагу необхідно приділити тим криницям, які використовуються для питної води. За таких умов основними споживачами водних ресурсів будуть виступати дрібні споживачі, яким важливо мати оперативну інформацію про стан та якість води, яку вони використовують в побуті. При цьому інформація із сайтів водоканалів для цих верств населення може бути складно доступна (якщо населення взагалі обізнане про їх наявність), рідко оновлюється та дані стосуються тільки офіційно використовуваних точок водозабору.

Аналізуючи дані щодо середніх значень показників якості проб підземних вод, відібраних у 2023 році в різних регіонах України [13], можна зробити висновок, що практично у всіх областях України спостерігається невідповідність за каламутністю, вмістом заліза та марганцю, а в центральних, східних та південних регіонах спостерігається тенденція до підвищення жорсткості води.

Одним із можливих рішень щодо надання доступу до інформації про якість води можуть бути інтерактивні карти, подібні до Карти якості води, розробленої ГО «ВУВТ «Вотернет», але які містять більш вузькоспеціалізовану інформацію про якість води тільки в криницях України. Така інтерактивна карта буде більш простою для сприйняття цільовим споживачем через меншу перенасиченість інформацією.

Використовуючи вибірку даних, як отриманих ГО «Вотернет», так і пізніше наданих в лабораторію іонного обміну у 2024 році (табл. 1), розроблено інтерактивну карту якості води з криниць https://waterdata-app.vercel.app/, яка допомагає візуалізувати споживачу якість води за відповідними показниками.

Таблиця 1 – Показники якості води за різними регіонами України, населені пункти яких розташовані вздовж р. Дніпро

	Забарвленість, град.	Каламутність, мг/дм³	Жорсткість загальна, мг-екв/дм³	Залізо загальне, мг/дм³	Марганець, мг/дм³	Нітрати, мг/дм³	Перманганатна окиснюваність, мг/дм³	Сухий залишок, мг/дм³
Значення показника за ДСАНПІН 2.2.4-171-10*	**<20**	**<0,58 (1,5)**	**<7**	**<0,2**	**<0,05**	**<50**	**<5**	**<1000**
м. Київ, Подільський р-н	6	0,3	8,8	0,016	0,01	29	1,1	558
м. Київ, Печерський р-н	67	1,72	7,1	0,204	0,01	291	8,25	624
м. Київ, Дарницький р-н	-	1,5	5,54	0,348	0,051	2	1,7	410
с. Бобриця, Київська область	7	0,47	8,08	0,064	0,01	58	0,9	624
с. Плюти, Київська область	22	0,7	5,88	0,222	0,054	4	3,6	552
м. Обухів, Київська область	2	0,2	18,56	0,01	0,01	197	2,1	1480
с. Українка, Кропивницький район, Кіровоградська область	8	0,1	10,72	0,01	0,01	76	1,75	997
м. Запоріжжя	47	31,3	6,84	8,00	2,07	2	8,55	874
м. Марганець, Дніпропетровська обл.	11	0,3	13,4	0,051	0,154	149	1,9	1703

Інтерактивна карта WaterData розроблена на відкритій платформі Leaflet an open-source JavaScript library for mobile-friendly interactive maps, режим доступу до ресурсу: https://leafletjs.com/reference.html#map-example.

На рис. 3 наведено сторінку інтерактивної карти, де відмічено точки відбору проб (міста і населені пункти) на кожен визначений показник.

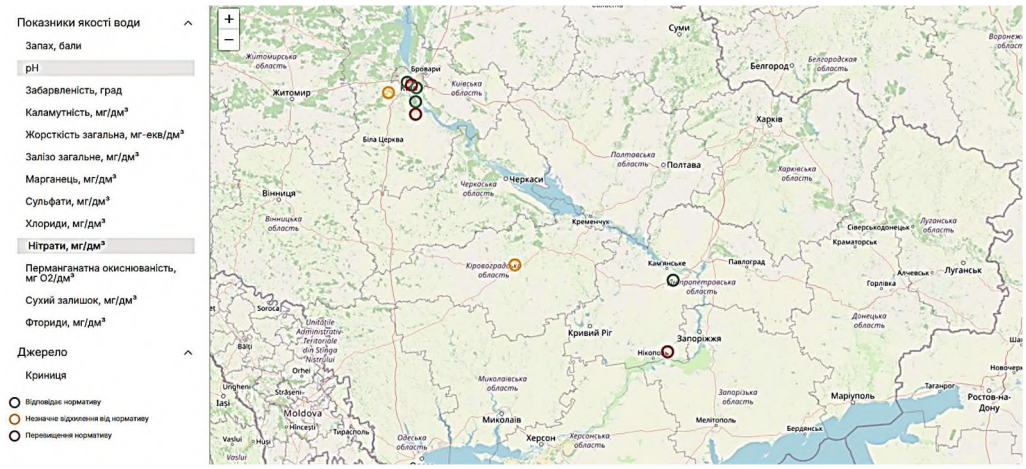


Рис. 3. Вигляд розробленої інтерактивної карти WaterData для здійснення моніторингу якості води з криниць в Україні

Отже, аналізуючи таблицю 1 та інтерактивну карту якості води з криниці в містах і селищах, які розташовані вздовж русла річки Дніпро, можна стверджувати, що в розглянутих населених пунктах якість води не відповідає нормативу хоча б за одним з розглянутих показників. З трьох розглянутих районів міста Київ найгірша ситуація з якістю води наявна в Печерському районі, невідповідність нормативу спостерігається за чотирма показниками: каламутність, перманганатна окиснюваність, вміст сполук заліза та нітратів, вміст останніх суттєво перевищує норматив. В південних регіонах, зокрема в м. Марганець, потрібно звернути увагу на такий показник, як сухий залишок, завищене значення якого вказує на те, що вода вже не є прісною і щоб її використовувати для пиття потрібно застосовувати інші методи підготовки води, зокрема знесолення.

Висновки. З початку війни сектор водопостачання та водовідведення зазнав пошкоджень та втрат. Бойові дії, які тривають дотепер, та атаки на критично важливу інфраструктуру від початку війни в Україні суттєво вплинули на надання послуг та якість води, яка використовується для споживання, у сільському господарстві та на виробництві. Інфраструктура зазнає значних пошкоджень, але найбільш суттєво – вздовж лінії фронту. У цих районах надання послуг із водопостачання здійснюється в аварійному режимі з метою запобігання зриву забезпечення населення водою. Через три роки після початку повномасштабної війни мільйони українців продовжують отримувати періодичні послуги, які не відповідають необхідним стандартам, – і це попри постійні зусилля постачальників екстрених та комунальних послуг.

За умов порушення роботи систем централізованого водопостачання альтернативним джерелом водозабору може бути кринична вода, що особливо актуально для малих населених пунктів або у віддалених регіонах. Кінцеві споживачі повинні володіти інформацією щодо якості води в цих місцях водозабору, що можна забезпечити, використовуючи потенціал громадських організацій та створюючи відкриті інтерактивні карти з актуальною інформацією про якість води.

Розроблено інтерактивну карту WaterData, яка містить інформацію про якість води в криницях в регіонах України, які розташовані за руслом р. Дніпро. Встановлено, що якість води в Україні погіршується за такими показниками, як забарвленість, каламутність, жорсткість та вміст сполук заліза, марганцю та нітратів.

Нині проводиться робота над створенням мобільного застосунку інтерактивної карти якості води WaterData, який дозволить споживачам оперативно відстежувати якість води у криницях, які є найменш захищеними джерелами води.

Подяка. Цю роботу було виконано в рамках проєкту прикладних наукових досліджень «Хімічно модифіковані мембрани для оперативного виявлення у природних водах нітрогеновмісних сполук як маркерів вибухових речовин» коштом Державного бюджету України (Державний реєстраційний номер 0124U001095).

Список використаних джерел

1. Environmental consequences of the Russian war in Ukraine. (2023). Clean Air Ukraine. URL: https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf.

2. Гапіч, Г., Онопрієнко, Д., & Новіцький, Р. (2024). Водна безпека України: наслідки війни та погляд у майбутнє. *Вода і водоочисні технології*, (1-2), 64-69.

3. Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries. (2022, March 15). *War in Ukraine threatens freshwater resources and water infrastructure* [Press release]. https://www.igb-berlin.de/en/news/war-ukraine-threatens-freshwater-resources-and-water-infrastructure.

4. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskyi, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A., & Gleick, P. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x.

5. United Nations Environment Programme. (2023, October). *Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach Ukraine, 2023*. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43696/Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

6. The World Bank Group. (2021, October 19). *Water supply and sanitation*. https://documents1.worldbank.org/curated/en/099021324115085807/pdf/P1801741bea12c012189ca16d95d8c2556a.pdf.

7. Всеукраїнське водне товариство "Вотернет" [WaterNet]. (n.d.). *Home page*. https://waternet.ua/.

8. Всеукраїнське водне товариство «WaterNet». (n.d.). *Проєкт "Безпечна питна вода в Україні: доступ до інформації про якість води та методи водопідготовки"*. https://waternet.ua/proiekt-finskkogo-fondu-miscevogo-spivrobitnictva.

9. Верховна Рада України. (2010). Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10.

10.Дрікер, Ю. (2023). Карта якості води: зміни в умовах війни. *Вода і водоочисні технології*, (1-2), 48-51.

11.Всеукраїнське водне товариство «WaterNet». (n.d.). *Карта якості води в Україні*. https://waternet.ua/water-map-fp.

12.Бережна, Ю., & Дрікер, Ю. (2025). Вплив війни на якість питної води. *Вода і водоочисні технології*, (1-2), 13-19.

13.Дрікер Ю. (2024). Підземні води України: важливий ресурс в умовах війни. *Вода і водоочисні технології, (1-2)*, 60-63.

References

1. Environmental consequences of Russian war in Ukraine: https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf.

2. Hapich H., Onopriienko D., Novitskyi R. (2024). Vodna bezpeka Ukrainy: naslidky viiny ta pohliad u maibutnie.[Water security of Ukraien: consequences of war and a look into the future.] *Voda i vodoochysni tekhnolohii – Water and water treatment technologies,* (1-2), 64-69.

3. Leibniz Institute of Freshwater Ecology and Inland Fisheries. (2022, March 15). *War in Ukraine threatens freshwater resources and water infrastructure* [Press release]. https://www.igb-berlin.de/en/news/war-ukraine-threatens-freshwater-resources-and-water-infrastructure.

4. Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure: https://www.nature.com/articles/s41893-023-01068-x.

5. Rapid enviromental Assessment of Kakhovka Dam Breach Ukraine. (2023). https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/43696/Kakhovka_Dam_Breach_Ukraine_Assessment.pdf?sequence=3&isAllowed=y.

6. Water supply and sanitation https://documents1.worldbank.org/curated/en/099021324115085807/pdf/P1801741bea12c012189ca16d95d8c2556a.pdf.

7. Vseukrainske vodne tovarystvo «Voternet» [All-Ukrainian water community "Waternet"] (НО «VUVT «Voternet») https://waternet.ua/.

8. Vseukrainske vodne tovarystvo «Voternet» [All-Ukrainian water community "Waternet"] *Proiekt "Bezpechna pytna voda v Ukraini: dostup do informatsii pro yakist vody ta metody vodopidhotovky" - Project "Safe Drinking Water in Ukraine: Access to Information on Water Quality and Water Treatment Methods"*. https://waternet.ua/proiekt-finskkogo-fondu-miscevogo-spivrobitnictva.

9. Verkhovna Rada Ukrainy. (2010). Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl «Hihiienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoiu» (DSanPiN 2.2.4-171-10). [Verkhovna Rada of Ukraine. (2010). On approval of the State Sanitary Norms and Rules "Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption" (DSanPiN 2.2.4-171-10)] https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10.

10. Driker Yu. Karta yakosti vody: zminy v umovakh viiny. (2023). [Water quality map: changes in wartime conditions.] *Voda i vodoochysni tekhnolohii – Water and Water Treatment Technologies*, (1-2), 48-51.

11. Vseukrainske vodne tovarystvo «Voternet» [All-Ukrainian water community "Waternet"]. *Karta yakosti vody v Ukraini. – Water quality map in Ukraine.* https://waternet.ua/water-map-fp.

12. Berezhna Yu., Driker Yu. Vplyv viiny na yakist pytnoi vody. (2025). *Voda i vodoochysni tekhnolohii – Water and Water Treatment Technologies*, (1-2), 13-19.

13. Driker Yu. Pidzemni vody Ukrainy: vazhlyvyi resurs v umovakh viiny. (2024).[The impact of war on the quality of drinking water.] *Voda i vodoochysni tekhnolohii – Water and Water Treatment Technologies,* (1-2), 60-63.

Отримано 23.07.2025

UDC 543.3

Yuliia Khezhun[1], Iryna Kosogina[2], Oleksii Kosohin[3]

[1]Bachelor-student Bachelor of the Department of Inorganic Substances Technology, Water Treatment and General Chemical Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: juliakhezhun@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0009-0000-2551-0224

[2]PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: kosoginairyna@gmail.com. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0002-9795-7110
Researcher ID: I-3714-2018. **SCOPUS Author ID:** 57220265618

[3]PhD in Technical Sciences, Associated Professor of the Department of electrochemical production technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: o.kosogin@kpi.ua. **ORCID:** https://orcid.org/0000-0001-8379-9580
Researcher ID: I-3040-2018. **SCOPUS Author ID:** 55463712800

MONITORING THE QUALITY OF DRINKING WATER SOURCES IN UKRAINE

The impact of military operations on freshwater resources and water infrastructure was analyzed. The results of the analysis showed that many water structures, including dams on reservoirs, water supply and water purification systems, and underground mines, were damaged or are under threat from military operations. The course of the protracted war in Ukraine requires increased attention to the role of water as a driving force of conflicts and to the impact of armed conflicts on water and water supply systems.

While in large cities, the presence of centralized or local water treatment stations allows us to somewhat reduce the negative impact of the consequences of military operations on water quality and bring its quality indicators up to regulatory requirements, in more remote regions or in the absence of normal operation of water supply systems, wells and boreholes are the main source of water. Under such conditions, the main consumers of water resources will be small consumers, for whom it is important to have operational information about the state and quality of the water they use in everyday life. End consumers should have information about water quality at these water intake points, which can be provided by using the potential of public organizations and creating open interactive maps with up-to-date information about water quality.

It was established that the following indicators were most often exceeding the norm: permanganate oxidizability, color, turbidity, dry residue, content of iron compounds, manganese and nitrates. Increased nitrate content in water can be observed not only as a result of leaching of fertilizer residues from agricultural lands, but also as a result of the destruction of fertilizer storage facilities as a result of shelling or due to the ingress of hydrolysis products or other chemical transformations of rocket fuel components and explosives.

An interactive WaterData map has been developed, which contains information about water quality in wells of Ukraine in regions located along the Dnipro River. It has been established that water quality in Ukraine is deteriorating in terms of such indicators as color, turbidity, hardness, and the content of iron, manganese, and nitrate compounds.

Currently, work is underway to create a mobile application for an interactive water quality map, WaterData, which will allow consumers to monitor the quality of water in wells, which are the least protected water sources.

***Keywords**: water; monitoring; water quality indicators; interactive map; state of water infrastructure.*

Fig.: 3. Table: 1. References: 13.

Хежун Ю. А., Косогіна І. В., Косогін О. В. Моніторинг якості джерел питної води в Україні. *Технічні науки та технології,* 2025. № 3(41). С. 353-363. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-353-363.