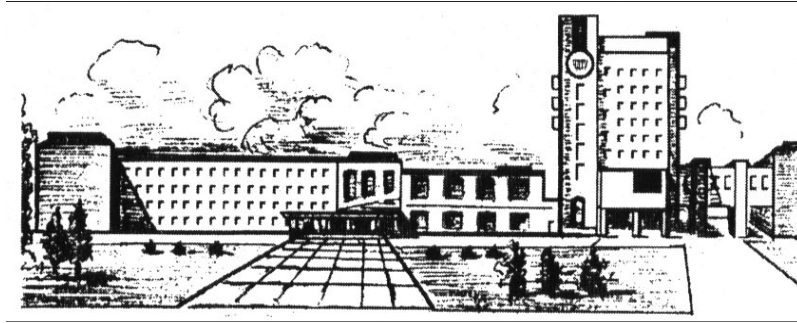


ISSN 2411-5363 (print)
ISSN 2519-4569 (online)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЧЕРНІГІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**



ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

№ 2(40)



Чернігів 2025

Друкується за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 7 від 30.06.2025 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 політехніка», 2025. – № 2(40). – 522 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»;

Охрімченко 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 Bembek, 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 С. 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»;

Дударев 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;

Сахо 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

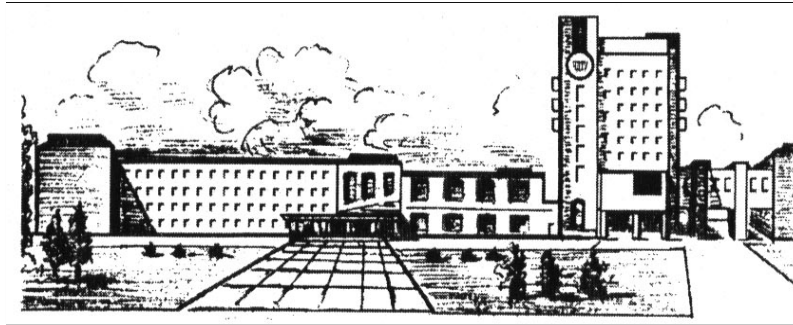
авіаційних та космічних досліджень, керівник лабораторії дистанційного зондування та аналізу, Саудівська Аравія;

Юрченко В. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури.



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

№ 1(39)



Chernihiv 2025

UDC 62:67.05
DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 7 dated 30.06.2024). 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. – № 2(40). – 522 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 Bembek, 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;

Cheliabieva 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;

Mykhailovskiy 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

<i>Книш О. Б., Бегень П. І., Білосор Ю. Ю., Білик О. А.</i> Дослідження кінематики руху циліндричної фрези при обробці книжкових блоків у машинах незшивного скріплення.....	9
<i>Адаменко Ю. І., Майданюк С. В., Плівак О. А., Лапковський С. В.</i> Перевірка точності індикації штангенциркулів	20
<i>Вансєв С. М., Чех О. Ю., Мерзляков Ю. С., Карпцов А. С., Мелейчук О. С.</i> Методика розрахунку максимально досяжного тиску рідинно-парового струминного ежектора з використанням термодинамічних діаграм	32
<i>Грабовський А. П., Бондарець О. А.</i> Пошкоджувальність при експлуатації конструкцій з анізотропних матеріалів	41
<i>Кондрашев П. В.</i> Моделювання розподілу порошкової композиції під впливом електромагнітного поля при реалізації технології DMLS.....	49
<i>Манохін А. С., Клименко С. А., Клименко С. А.</i> Параметри перерізу зрізу під час фінішного точіння різцями, що працюють за косокутною схемою різання.....	58
<i>Приходько В. П., Данилова Л. М., Лапковський С. В., Сапон С. П., Фролов В. К., Кравець О. М.</i> Автоматизоване оцінювання впливу схем формування технологічних розмірів на їхню точність.....	68
<i>Солодкий В. І.</i> Тріангуляція гвинтових поверхонь у процесах формоутворення	87
<i>Haievskiy V., Haievskiy O., Usenko D.</i> Determination of the applicability of the normal and Weibull distributions to the diameter of welded pores.....	97
<i>Бриндас А. М., Терницький С. В.</i> Конструктивно-технологічні особливості плоскоциліндрового преса для штанцювання розгортки картонних пакувань.....	108
<i>Бугров Д. Ю., Коробко Б. О.</i> Дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки у вібростімувачі з активним робочим органом.	116
<i>Пронін В. А., Охріменко О. А., Музичка Д. Г.</i> Застосування методу Тагучі для визначення розшарування при механічній обробці склопластику	128
<i>Yevdokymov O., Kolesnyk V., Dovhopolov A., Vykov M., Fesenko D.</i> Increasing productivity of processing the mortar body component.	137
<i>Іванченко І., Кореньков В., Лашина Ю., Мельник О., Лапач С.</i> Вплив режимів різання на стійкість різального інструменту при свердлінні вуглепластику	148
<i>Абаєв А. Ю., Швед М. П.</i> Інноваційні полімери для стійкого майбутнього: екструзія біо- та фотодеструктивних полімерних плівок.	158
<i>Василенко А. С., Мельник О. О., Субін А. А.</i> Алгоритм розрахунку режимів оброблення осьовим лезовим різальним інструментом	164

РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Довбиш А. С., Мироненко М. І., Супруненко М. К., Ковалевський С. О., Отрощенко М. С.</i> Глибоке інформаційно-екстремальне машинне навчання системи розпізнавання електроміографічних біосигналів	171
<i>Морохович В. С., Смолен А. О.</i> Розробка мобільної інформаційної системи для підтримки здорового способу життя	185
<i>Синенко М. А., Ткач Ю. М.</i> Модель динаміки поведінки агентів соціальних мереж.....	196
<i>Трунов О. І., Дорош М. С.</i> Систематизація підходів до оцінки ризиків інформаційної безпеки транспортно-логістичних центрів.	207
<i>Хижняк А. В., Пріла О. А.</i> Розробка системи автоматизованої генерації та перевірки параметризованих практичних завдань	221
<i>Байда В. Д., Велигорський О. А.</i> Методологія діагностики апаратного забезпечення з використанням інформаційної технології цифрового двійника	234
<i>Болсун С. В., Казимир В. В.</i> Гібридний метод маршрутизації задач у хмарному середовищі з використанням нейромережевого прогнозування та генетичної оптимізації.....	254
<i>Зетченко В. С., Задорожній А. О.</i> Моделювання та аналіз несправностей та затримок громадського транспорту з використанням баєсових мереж довіри й генеративного ШІ.....	265
<i>Ілляшенко О. М.</i> Порівняльний аналіз розміру інсталяційного пакета і часу запуску мобільного застосунку	275

Коваленко М. А., Войцеховська М. М. Автоматизація пре-будівництва: огляд інструментів штучного інтелекту та практичних застосунків у галузі	284
Коваленко С. В., Красножон О. В. Методи первинної обробки даних у системах ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерка.....	294
Усік А. М., Казимир В. В. Показники ефективності перспективного оцінювання систем Інтернету речей.....	303
Кондус О. С., Ткаченко О. М. Модуль інтелектуалізованої підтримки розробки програмного забезпечення	312

РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Жигунов Д. О., Ковальов М. О., Хоренжій Н. В., Ковальова В. П. Дослідження параметрів змішування технологічних добавок з пшеничним борошном	325
Луканін О. С., Мельник Н. Б. Кореляції впливу ґрунту та інших факторів на якість яблучних дистилатів	338
Хоменко В. Г., Макєєва І. С., Кислова О. В., Нікулін Д. О. Розробка ефективної хімічної технології очищення графіту для анодів літій-іонних акумуляторів.....	354
Березкина Н. В., Кохан О. О. Перспектива використання кокосового борошна при розробці рецептурної композиції бісквітного напівфабрикату	362
Володимиров В. В. Огляд шляхів підвищення відмовостійкості електронних пристроїв за рахунок використання сучасних полімер-неорганічних композитних матеріалів з електронною провідністю.....	368
Шишак О. М., Топільницький П. І. Дослідження впливу депресора на реологічні властивості нафти західного регіону України.	377

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

Клюєв О. В. Спостерігач швидкості асинхронної машини на основі вектора потокозчеплення ротора.	385
Соловійов В. Г., Романова І. Ю. Причини дестабілізації процесу електрошлакового наплавлення у стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі.....	400
Єрмолов С. В., Денисов Ю. О. Вплив параметрів акумулятора та гвинтомоторної групи на тривалість польоту БПЛА	411
Захарченко Д. С., Степенко С. А. Дослідження елементів накопичення електроенергії у складі автономних електроенергетичних систем на основі фотоелектричних перетворювачів	420
Шокодько Д. А., Хоменко М. А. Вибір сонячних панелей для автономних систем живлення безпілотних літальних апаратів.....	432

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

Мамонов К. А., Штерндок Е. С., Касьянов В. В., Бурвіков І. Ю., Берднік Д. Д. Забезпечення геодезичного контролю відновлювальних робіт у системі розвитку територій	445
Воронков О. О., Долінська К. О., Євдокімов А. А. Дослідження земельного покриття за супутниковими даними.....	454
Кухтар Д. В., Дорош Л. І. Методика орієнтування наземних кутових відбивачів для супутникового радіолокаційного знімання.....	463
Сосса Б. Р., Гавришук В. В. Використання методу Монте-Карло при дослідженні похибок геодезичних приладів	472
Терещук О. І., Заворотний С. М., Сучков А. Сучасні системи автоматизованого інженерно-геодезичного контролю та керування машинами в процесі будівництва автомобільних доріг.....	485
Титюк А. А., Ярова Т. П., Середа С. Ю., Сіренко К. О., Правоторова А. В. Інтеграція технології 3D-сканування при створенні моделі будівлі ліцею	493
Дяченко С. В. Реконструкція системи опалення як елемент термомодернізації старих багатоповерхових житлових будинків	502
Тарасович Я. В., Нікулішин В. І. Геоінформаційний підхід до візуалізації даних гідрологічних постів у львівській області	510

ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ.....	521
---	------------

CONTENT

SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE
AND MACHINE BUILDING

<i>Knysh O., Behen P., Bilozor Y., Bilyk O.</i> Investigation of the kinematics of cylindrical milling cutter motion in the processing of book blocks in perfect binding machines	9
<i>Adamenko Yu., Maidaniuk S., Plivak O., Lapkovsky S.</i> Verification of the calipers display accuracy.....	20
<i>Vanieiev S., Chekh O., Merzliakov Iu., Karptsov A., Meleichuk O.</i> Method of calculating the maximum achievable pressure of a liquid-vapor jet ejector using thermodynamic diagrams	32
<i>Hrabovskiy A., Bondarets O.</i> Damage evolution during the service life of structures made of anisotropic materials	41
<i>Kondrashev P.</i> Modeling of distribution of the powder composition under the influence of the electromagnetic field when implementing DMLS technology	49
<i>Manokhin A., Klymenko S., Klymenko S.</i> Parameters of the cross-section of the cut during finishing turning with cutters operating with an oblique cutting pattern	58
<i>Prykhodko V., Danylova L., Lapkovsky S., Sapon S., Frolov V., Kravets O.</i> Automated assessment of the influence of technological dimensioning schemes on their accuracy.....	68
<i>Solodkyi V.</i> Triangulation of helical surfaces in forming processes	87
<i>Haievskiy V., Haievskiy O., Usenko D.</i> Determination of the applicability of the normal and Weibull distributions to the diameter of welded pores.....	97
<i>Bryndas A., Ternytskyi S.</i> Design and technological features of the flat cylinder press for die-cutting of paperboard packaging cut-outs	108
<i>Buhrov D., Korobko B.</i> Investigation of combined vibratory-abrasive treatment in vibratory mixing system with an active working element	116
<i>Pronin V., Okhrimenko O., Muzychka D.</i> Application of the taguchi method for evaluating delamination during the machining of fiberglass	128
<i>Yevdokymov O., Kolesnyk V., Dovhopolov A., Bykov M., Fesenko D.</i> Increasing productivity of processing the mortar body component.	137
<i>Ivanchenko I., Korenkov V., Lashina Yu., Melnyk O., Lapach S.</i> Influence of cutting modes on the cutting tool life when drilling carbon-fiber reinforced polymer.....	148
<i>Abayev A., Shved M.</i> Innovative polymers for a sustainable future: extrusion of bio- and photo-degradable polymer films.....	158
<i>Vasylenko A., Melnyk O., Subin A.</i> Algorithm for calculating conditions for axial cutting tools.....	164

SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

<i>Dovbysh A., Myronenko M., Suprunenko M., Kovalevskiy S., Otroshchenko M.</i> Deep information-extreme machine learning for recognition of electromyographic biosignals	171
<i>Morokhovych V., Smolen A.</i> Development of a mobile information system to support a healthy lifestyle	185
<i>Synenko M., Tkach Yu.</i> Model of the behavior dynamics of social network agents.....	196
<i>Trunov O., Dorosh M.</i> Systematization of approaches to the information security risk assessment of transportation and logistics centers	207
<i>Khyzhniak A., Prila O.</i> Designing a system for automated generation and automated assessment of parameterized practical assignments.....	221
<i>Baida V., Velihorskyi O.</i> Methodology for hardware diagnostics using an information technology of digital twin	234
<i>Bolsun S., Kazymyr V.</i> Hybrid method of routeing of tasks in cloud environment using neural network forecasting and genetic optimization.....	254
<i>Zetchenko V., Zadorozhniy A.</i> Construction of bayesian trust networks for forecasting passenger flows of public transport using generative artificial intelligence	265
<i>Illiaschenko O.</i> Comparative analysis of installation package size and startup time of a mobile application.....	275

Kovalenko M., Voitsekhovska M. Automation of pre-construction: an overview of artificial intelligence tools and practical applications in the industry.....	284
Kovalenko S., Krasnozhon O. Study of primary data processing methods in user identification systems based on keystroke dynamics	294
Usik A., Kazymyr V. Performance indicators for prospective evaluation of internet of things systems	303
Kondus O., Tkachenko O. Intellectualized support module of the software development	312

SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

Zhygunov D., Kovalov M., Khorengy N., Kovalova V. Research on the parameters of mixing technological additives with wheat flour	325
Lukanin O., Melnyk N. Correlations between the influence of soil and other factors on the quality of apple distillates.....	338
Khomenko V., Makyeyeva I., Kyslova O., Niculin D. Development of graphite purification efficient chemical technology for lithium-ion battery anodes.....	354
Berezkyina N., Kokhan O. Prospects of using coconut flour in developing a formulation of a biscuits semi-finished produc.....	362
Volodymyrov V. Using modern polymer-inorganic composite materials with electronic conductivity increasing the fault tolerance of electronic devices.....	368
Shyshchak O., Topilnytskyy P. Study on effect of depressant on rheological properties of oils from the western region of Ukraine	377

SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

Kliuiev O. Speed observer of an induction machine based on the rotor flux linkage vector.....	385
Solovyov V., Romanova I. Reasons of destabilization of the electrosag melting process in the stationary current-based crystalliser.....	400
Yermolov S., Denisov Yu. Influence of battery and propeller group parameters on the UAV flight duration	411
Zakharchenko D., Stepenko S. Research of electricity storage elements in autonomous electric power systems based on photoelectric converters	420
Shokodko D., Khomenko M. Selection of solar panels for autonomous power systems of unmanned aerial vehicles	432

SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

Mamonov K., Shterndok E., Kasyanov V., Burvikov I., Berdnik D. Provision of geodesic control of restoration works in the system of territorial development	445
Voronkov O., Dolinska K., Yevdokimov A. Study of land cover using satellite data	454
Kukhtar D., Dorosh L. The orientation method of terrestrial corner reflectors for the satellite radar observation	463
Sossa B., Gavryshchuk V. Application of the Monte Carlo method in the study of errors of geodetic instruments	472
Tereshchuk O., Zavorotny S., Suchkov A. Modern systems of automated engineering and geodesic control and machine control in the process of road construction	485
Tytiuk A., Yarova T., Sereda S., Sirenok K., Pravotorova A. Integration of 3D scanning technology in the development of a lyceum building model	493
Diachenko S. Reconstruction of the heating system as an element of thermal modernization of old multi-story residential buildings	502
Tarasovych Ya., Nikulishyn V. Experience of using a geo-information approach for visualization of hydrological posts data in the Lviv region.....	510

BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES	521
--	------------

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-9-19](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-9-19)

УДК 686.12.056

**Олег Богданович Книш¹, Петро Ігорович Бегень²,
Юрій Юрійович Білосор³, Олег Андрійович Білик⁴**

¹доктор 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](https://orcid.org/0000-0001-5854-1879)

²кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: Petro.I.Behen@lpnu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1999-2479>

³аспірант 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>

⁴аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: olehbilyk13@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3123-5185>

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ РУХУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФРЕЗИ ПРИ ОБРОБЦІ КНИЖКОВИХ БЛОКІВ У МАШИНАХ НЕЗШИВНОГО СКРІПЛЕННЯ

Скріплення книжково-журнальної продукції клеєм на машинах незшивного скріплення передбачає виконання відповідних операцій. Чільне місце серед них посідає підготовка корінців книжкових блоків до нанесення клею. Для покращення міцності та довговічності незшивного клейового скріплення, зменшення потужності привода секції обробки корінців книжкових блоків пропонується циліндрична фреза з пасивним приводом. Її обертовий рух забезпечується прокочуванням фрези по рухомому книжковому блоку, а осьове переміщення – кулачковим механізмом із нерухомим торцевим кулачком. Досліджено кінематичні параметри руху циліндричної фрези. Проведено віртуальну симуляцію роботи пристрою з урахуванням обертового та осьового переміщення фрези. Результати порівняльного аналізу аналітичних досліджень та віртуального експерименту засвідчили їхню абсолютну ідентичність.

Ключові слова: книжковий блок; незшивне клейове скріплення; закон періодичного руху; торцевий кулачок; швидкість; прискорення; привод; система автоматизованого проектування.

Рис.: 6. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Широке застосування незшивного клейового скріплення (НКС) при виготовленні книжково-журнальної продукції зумовлене низкою технологічних та економічних переваг цього методу, серед яких: висока продуктивність машин незшивного скріплення, можливість їхнього агрегування у виробничі поточкові лінії, скорочення виробничого циклу, невелика собівартість, універсальність застосування. Проте питання підвищення експлуатаційних характеристик книг, скріплених клеєм, таких як міцність, довговічність, зручність читання, станом на сьогодні залишає поле для вдосконалень та творчого наукового пошуку.

Постановка проблеми. Як засвідчують експлуатаційні випробування міцності та довговічності незшивного клейового скріплення, ці параметри, які характеризують його якість, значною мірою залежать від дотримання технологічних вимог до НКС. Серед цих вимог ключову роль відіграє підготовка корінців книжкових блоків до нанесення клею. Метою цієї підготовки є розвинення мікрогеометрії та нанесення на корінець канавок для збільшення площі контакту між клеєм та корінцем, кращої адгезії. На існуючих машинах

незшивного скріплення ці задачі виконують секції торшонування, які вирізняються конструктивною складністю та високою вартістю інструменту, індивідуальним приводом з високими частотою обертання та споживаною потужністю. Тому доцільним є впровадження нових пристроїв для підготовки корінців книжкових блоків, у яких виконавчий інструмент отримуватиме привод від транспортної системи книжкового блока через безпосередній контакт з ним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Доступна у відкритих джерелах інформація дає можливість окреслити два основні напрямки удосконалення *НКС* книжково-журнальної продукції. Перший – удосконалення клеїв і технології їхнього нанесення на корінець, другий – удосконалення пристроїв та засобів обробки корінців.

Питання удосконалення технології нанесення клеїв, оцінка міцності *НКС* розглянуті у працях [1–3]. У роботі [1] пропонується здійснювати нанесення клею шляхом двостороннього розпуску аркушів. Такий підхід очевидно потребуватиме змін у конструкції машини, що не завжди виправдано. Науковці у статті [2] пропонують оригінальний підхід до оцінювання міцності *НКС*. Для цього розроблено математичні моделі, що описують виривання аркушів із книжкових блоків. Слід відзначити, що моделювання умов експлуатації лише частково відтворює реальні умови експлуатації книг. Ця проблема вирішена авторами в роботі [3], у якій наведено результати експериментальних досліджень міцності *НКС* методом «pull»-тесту.

На машинах незшивного скріплення книжково-журнальної продукції у пристроях для обробки корінців перед нанесенням клею застосовуються дискові інструменти, що обертаються навколо власної осі [4]. Їхньою перевагою є простота привода: двигун – муфта – інструмент. Відомий також привод із застосуванням у якості мультиплікатора зубчастопасової передачі, яка збільшує оберти інструмента до 6000 об/хв. Найбільш уживані у виробничих машинах незшивного скріплення дискові інструменти мають і значні недоліки. Конструкція різальних елементів (різців, дискових ножів та ін.) доволі складна; часто застосовується кількаступенева обробка, що передбачає застосування 3-4-х інструментів з окремим приводом кожен. Роботу дискових інструментів супроводжує значний шум, інтенсивне виділення паперового пилу. Загальна потужність привода секції обробки корінців може становити 7-8 кВт, а габарити (довжина) сягати 2 м. Ці фактори спонукають виробників устаткування та науковців до пошуку альтернативних пристроїв та засобів обробки корінців при клейовому скріпленні книжково-журнальної продукції.

У працях [5; 6] автори для обробки корінців пропонують застосовувати ексцентрично закріплений дисковий ніж. Проведені аналітичні дослідження кінематики процесу обробки, а також експериментальні дослідження засвідчили дієвість такого способу. До його недоліків слід віднести ексцентричне закріплення ножа, що може спричинити виникнення значних інерційних навантажень при великій частоті обертання.

Відомі роботи [7; 8], що передбачають застосування циклових механізмів для привода різального інструменту. Такі пристрої є ефективними лише на малопродуктивних машинах, оскільки при великих швидкостях інерційні навантаження стають критичними й можуть спричинити вібрації та руйнування привода.

Одним із напрямків наукових досліджень, які ведуться на кафедрі КППВ Національного університету «Львівська політехніка» є застосування інструментів для обробки корінців без електромеханічного привода. Серед них багатолезові різальні інструменти, які застосовуються для зрізування корінцевих фальців книжкових блоків [9]. Проведені експериментальні дослідження засвідчили їхню ефективність. До недоліків багатолезових різальних інструментів слід віднести складність монтажу значної кількості лез в одній площині та велику довжину різального інструменту.

Також відомі пристрої, що передбачають застосування інструментів з пасивним приводом для обробки корінців. Серед них циліндричний інструмент із гвинтовою різальною крайкою [10], циліндрична фреза [11]. Особливістю цих інструментів є їхній привод за допомогою фрикційного контакту з корінцем рухомого книжкового блока. Така схема привода інструментів значно спрощує конструкцію секції обробки корінців, не потребує застосування окремого привода для обертового різального інструмента, мінімізує рівень шуму при виконанні технологічної операції. Також, як засвідчили експериментальні дослідження, обробка книжкових блоків циліндричною фрезою з пасивним приводом забезпечує високу міцність та довговічність *НКС* [12].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Дослідження обробки корінців книжкових блоків циліндричною фрезою проводились здебільшого для випадку її обертового руху навколо власної осі завдяки фрикційному контакту із книжковим блоком. Питання надання фрезі додаткового осьового переміщення частково розглянуто в роботі [4]. Проведені дослідження стосуються визначення інерційних навантажень від зворотно-поступального руху фрези для різних законів періодичного руху. Проте недослідженою залишається задача дослідження кінематики руху циліндричної фрези з урахуванням її осьового переміщення завдяки застосуванню торцевого кулачка. Також актуальною залишається задача формування профілю торця кулачка, наприклад із застосуванням системи автоматизованого проектування Autodesk Inventor із залученням можливостей інструменту 3D-ескізу.

Мета статті – провести аналітичні дослідження кінематичних параметрів осьового переміщення циліндричної фрези з пасивним приводом та виконати їхній порівняльний аналіз із результатами віртуальної симуляції руху фрези в модулі Dynamic Simulation програми Autodesk Inventor, побудувати 3D-ескіз профілю торцевого кулачка.

Виклад основного матеріалу дослідження. Підготовку корінця книжкового блока запропоновано здійснювати багатолезовим циліндричним інструментом (далі – фрезою), який обточує книжковий блок при його переміщенні транспортною системою машини *НКС* внаслідок контакту лез з його корінцем. За таким принципом роботи фреза не потребує індивідуального привода, її обертання забезпечується книжковим блоком, а нанесення канавок проходить завдяки протискуванню лез фрези у корінець [11; 12]. У роботі [4] запропоновано додати осьове переміщення фрезі, що надаватиме таких переваг методу:

- зменшення навантажень завдяки додаванню переміщення фрези вздовж різальних крайок лез;
- підвищення якості утворених канавок за рахунок переплітання волокон аркушів паперу при утворенні канавок.

Додаткове осьове переміщення фрези в опорах реалізоване за рахунок нерухомого циліндричного торцевого кулачка, який обточує ролик, що через важіль жорстко з'єднаний з фрезою. Таке рішення зберігає всі переваги вдосконалюваного, оскільки для надання додаткового осьового переміщення фрезі також не потрібний окремий привод.

Торцевий кулачок є відповідальним елементом у пристрої нанесення канавок, оскільки він задає закон періодичного руху, за яким переміщуватиметься фреза. Тому під час проведення експериментальних досліджень на стенді, що відтворюватиме описаний метод підготовки корінця книжкового блока, для отримання достовірних даних щодо інерційних сил, спричинених осьовим переміщенням фрези, потрібно точно виготовити кулачок. Інерційні сили створюватимуть додаткове навантаження на привод транспортера книжкових блоків, величину якого потрібно оцінити стосовно базових навантажень привода, щоб обґрунтувати доцільність впровадження запропонованого способу.

Враховуючи складність профілю кулачка, його виготовлення доцільно реалізувати на верстаті з числовим програмним керуванням (системою CAM). Для цього є необхідною тривимірною цифровою моделлю кулачка, яка спроектована засобами систем автоматизованого проектування (середовищ CAD). Для проектування було обрано середовище Autodesk Inventor через широкі функціональні можливості та можливість інтегрування із системами CAM [13].

На початковому етапі проектування у файлі моделі кулачка в середовищі Autodesk Inventor створено масив змінних параметрів інваріантів переміщень a_k для 20 поточних позицій із кутовим кроком 18° та введено їх у базу користувацьких функцій середовища (рис. 1).

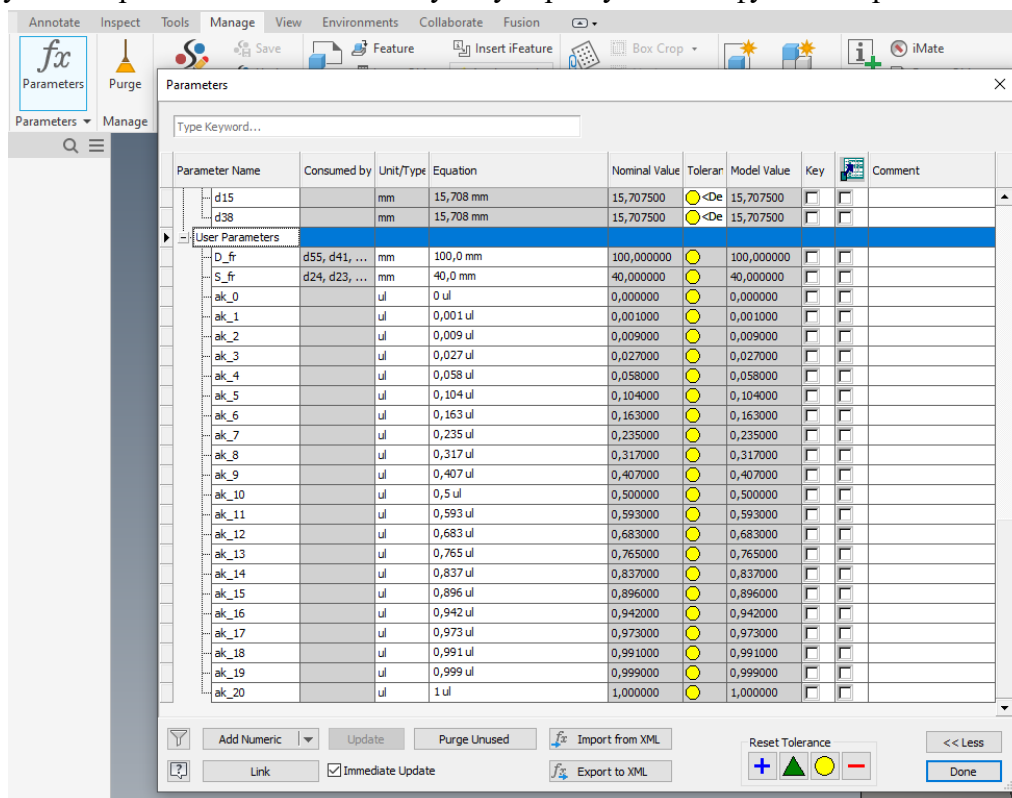


Рис. 1. Вікно користувацьких функцій з масивом значень інваріантів переміщення a_k для закону періодичного руху Поліном 3-го ступеня «Шуна» середовища Autodesk Inventor
Джерело: розроблено авторами

За введеним масивом значень поточних інваріантів переміщень змодельовано криву переміщень для значення осьового переміщення фрези $S_{фр} = 40$ мм, яке було обрано з врахуванням гарантованого перекривання книжкового блока завтовшки 25 мм, що є достатнім для виготовлення переважної більшості книжкової продукції із застосуванням НКС. Також було враховано умову забезпечення сприятливих кутів тиску у кулачковій парі. Як було встановлено у праці [4], мінімальний радіус кулачка з умови дотримання кутів тиску в межах 30° , становить $R_k = 46,86$ мм, тобто діаметр D_k :

$$D_k \geq 2 \times R_k.$$

Діаметр торцевого кулачка $D_k = 100$ мм обрано конструктивно виходячи з умови забезпечення кріплення обертового ролика на важелі до осі фрези.

Побудову ескізу кривої здійснено сплайном по масиву точок. Положення кожної точки визначається координатами, у яких вісь абсцис x , довжина якої відповідає довжині кола основи циліндра, що служить заготовкою для кулачка обраного діаметра, поділено на рівні частини відповідно до кількості позицій побудови:

$$x_{Pi} = \frac{\pi \cdot D_k}{i} + \frac{\pi \cdot D_k}{i+1} + \dots + \pi \cdot D_k,$$

де $I = 20$ – кількість поточних позицій для побудови профілю кулачка;
 $i = 1 \dots I$ – поточне значення позиції.

Вздовж осі ординат у поточне положення точки визначається як добуток позиційного інваріанта переміщення відповідного закону періодичного руху на значення максимального переміщення фрези: $y_{Pi} = a_k \times S_{\text{фр}}$.

Сплайнову криву побудовано у площині, дотичній до твірної циліндра кулачка, а вісь у кривій збігається з віссю циліндра (рис. 2).

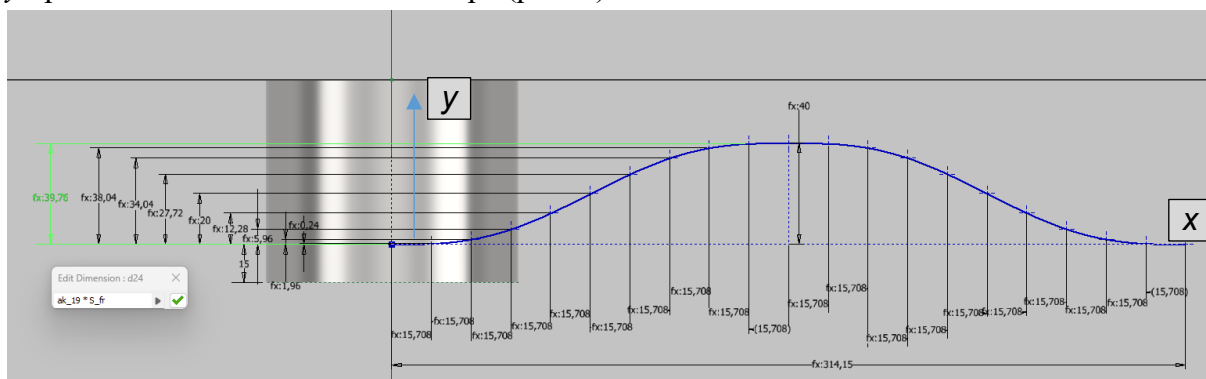


Рис. 2. Фрагмент побудови кривої переміщень для закону періодичного руху «Синусоїда» у середовищі Autodesk Inventor

Джерело: розроблено авторами.

Профілювання торця кулачка у програмі Autodesk Inventor відбувалося з залученням можливостей інструменту 3D-ескізу. Для його утворення насамперед потрібно «огорнути» траєкторією переміщення фрези, побудованою на площині, циліндричну поверхню заготовки кулачка. Цього досягнуто завдяки застосуванню команди Проекціювання на поверхню (Project to Surface), у якій як поверхню (Face) обрано заготовку кулачка, а кривою (Curve) є побудований сплайн (рис. 3). Завершення побудови профілю виконано завдяки інструменту Sweep, у якому вздовж просторової кривої утвореного 3D-ескізу утворено паз для ролика.

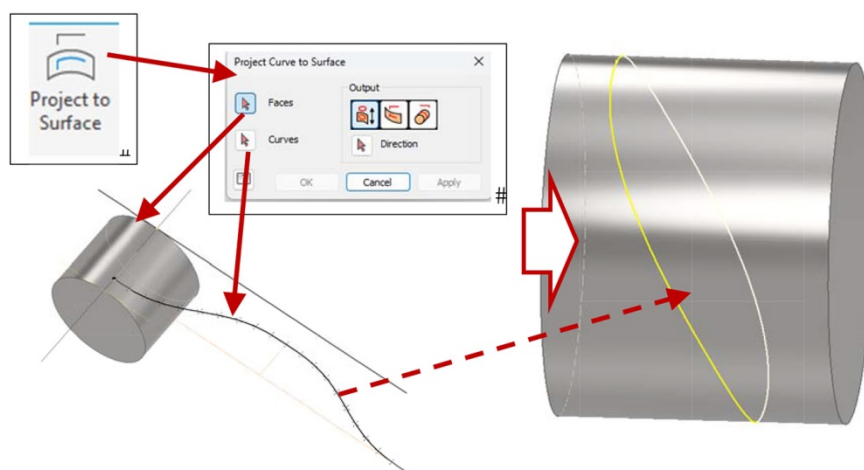
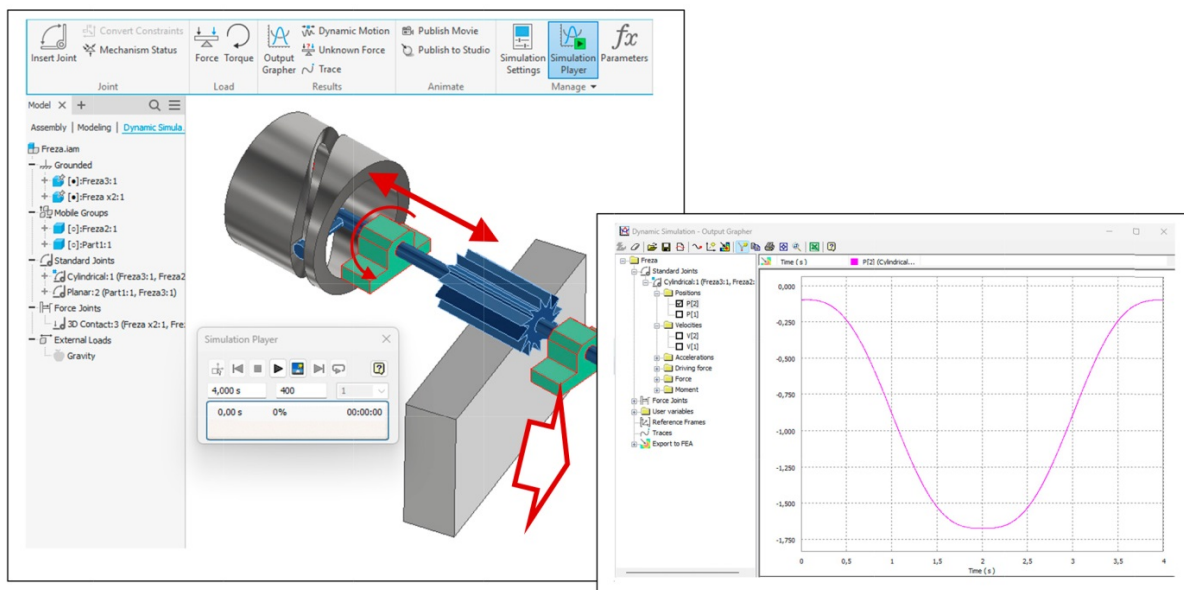


Рис. 3. Інструменти середовища Autodesk Inventor для побудови 3D-ескізу профілю торцевого кулачка

Джерело: розроблено авторами.

Побудована тривимірна модель торцевого кулачка стала основою для віртуального макета пристрою підготовки корінця. Пристрій відтворено спрощено, а саме тільки основні його елементи (кулачок, фрезу з роликом, підшипникоопори). На основі цього макету проведено віртуальну симуляцію складного просторового руху фрези у модулі Dynamic Simulation. Призначено обертову кінематичну пару (Joint) між віссю фрези та опорою, та 3D Contact для поверхонь ролика і торця кулачка (рис. 4).

Для спрощення обчислень програми у макеті вилучено пружину, що здійснює силове замикання ролика до кулачка, а сам кулачок виготовлено пазовим.



а

б

Рис. 4. Ілюстрація віртуальної симуляції руху фрези у модулі Dynamic Simulation програми Autodesk Inventor (а), проміжний результат – графік осьового переміщення фрези (б)

Джерело: розроблено авторами.

Результати віртуальної симуляції представлено у вигляді осцилограми, яка відображає графік лінійної швидкості фрези (рис. 5). Як можемо бачити з графіка, значення швидкості розпочинаються з нуля, плавно зростають і спадають, а сам графік є симетричним, що відповідає спроектованому профілю кулачка.

За результатами проведеної віртуальної симуляції руху фрези отримано значення лінійної швидкості її руху. Ці дані використано для порівняльної оцінки з результатами теоретичного кінематичного аналізу параметрів руху фрези. Для аналізу серед кінематичних параметрів обрано лінійну швидкість, оскільки її значення на графіках віртуальної симуляції мають невелику кількість шумів і водночас криві швидкості наочно ілюструють відмінності в характері руху фрези при виборі різних законів її періодичного руху.

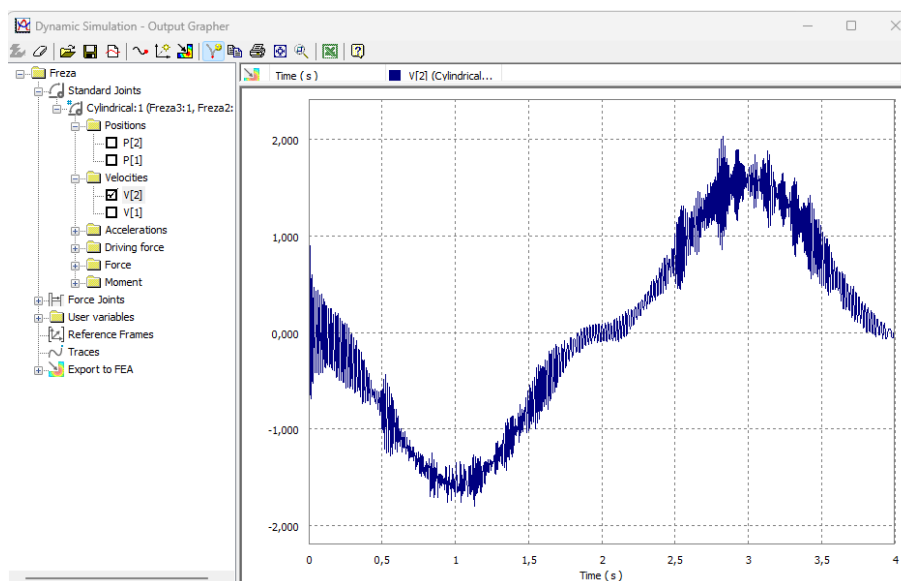


Рис. 5. Графічний результат віртуальної симуляції у вигляді графіка залежності лінійної швидкості фрези від періоду одного циклу
Джерело: розроблено авторами.

Порівняльний аналіз виконано для трьох характерних законів періодичного руху:

- циклоїдального типу – «Синусоїда» (константа піка швидкості $B = 2,0$; константа піка прискорення $C = 6,28$; константа кінетичної потужності $D = 8,612$) [14];
- гармонічного типу – «Косинусоїда» ($B = 1,57$, $C = 4,935$, $D = 3,875$);
- поліном 3-го ступеня «Шуна» ($B = 1,875$, $C = 5,771$, $D = 6,686$).

Для кожного закону періодичного руху за наведеною вище методикою змодельовано циліндричний кулачок з відповідним профілем та проведено симуляцію руху фрези, отримано відповідні графіки кінематичних параметрів.

Інваріанти кінематичних характеристик для обраних законів руху визначаються за відомими залежностями [14]:

$$\text{«Синусоїда»}: a_k = k - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi k; b_k = 1 - \pi \cos \pi k; c_k = 2\pi^2 \sin 2\pi k.$$

$$\text{«Косинусоїда»}: a_k = 0,5(1 - \cos \pi k); b_k = 0,5 - \pi \sin \pi k; c_k = 0,5\pi^2 \cos \pi k.$$

$$\text{«Шуна»}: a_k = A_2 k^2 + A_3 k^3 + A_4 k^4 + \dots + A_n k^n; b_k = 2A_2 k + 3A_3 k^2 + 4A_4 k^3 + \dots + nA_n k^{n-1}; c_k = 2A_2 + 6A_3 k + 12A_4 k^2 + \dots + n(n-1)A_n k^{n-2}$$

де a_k b_k c_k – інваріанти переміщення, швидкості та прискорення відповідно;

$A_2 \dots A_n$ – сталі коефіцієнти полінома закону руху.

Визначення поточних значень лінійної швидкості фрези, що приводиться від торцевого кулачка, проводили у модульній системі $[m, S, T]$ за залежністю: $V_\phi = b_k \cdot \frac{S}{T}$ [14].

Отримані дані з програми Autodesk Inventor експортовано у середовище електронних таблиць Microsoft Excel, де застосовано команду вибору з масиву дискретного числа значень з кроком 20 для спрощення візуального представлення на графіку. У цій же програмі за наведеними вище залежностями визначено теоретичні поточні значення швидкості фрези. На рис. 6 наведено графіки лінійної швидкості фрези при описаних вище законах її руху за таких початкових параметрів: хід фрези $S = 40$ мм, період одного циклу переміщення $T = 1$ с.

На графіках рис. 6 зображено: крива 1 – аналітично визначена лінійна швидкість фрези, крива 2 – швидкість, отримана за результатами віртуальної симуляції.

Аналізуючи отримані графіки, бачимо, що їх характер, попри наявність шумів у кривих, отриманих у результаті симуляції, збігається, аналітичні криві повністю повторюють криві симуляції. На кривих чітко прослідковуються характерні особливості з плавним розгоном при циклоїдальному законі руху (графік *a* на рис. 6, а також спостерігаємо мінімальне пікове значення швидкості при гармонічному законі (графік *в* на рис. 6), яке становить 0,12 м/с, що на 25 % менше за пік швидкості при законі руху «Шуна» (графік *б* на рис. 6) та на 42 % менше за максимум швидкості при циклоїдальному законі (графік *a* на рис. 6).

Висновки. Аналіз літературних джерел показав, що удосконалення якості НКС здійснюється у напрямку пошуку нових пристроїв та засобів обробки корінців книжкових блоків. Для подальшого розвитку та удосконалення у статті розглянуто пристрій обробки корінців циліндричною фрезою з пасивним приводом. Запропонований пристрій позитивно вирізняє відсутність індивідуального привода. Виконавчий інструмент – фреза, отримує обертовий рух внаслідок перекичування по корінцю рухомого книжкового блока, а осьовий зворотно-поступальний – від торцевого нерухомого кулачка.

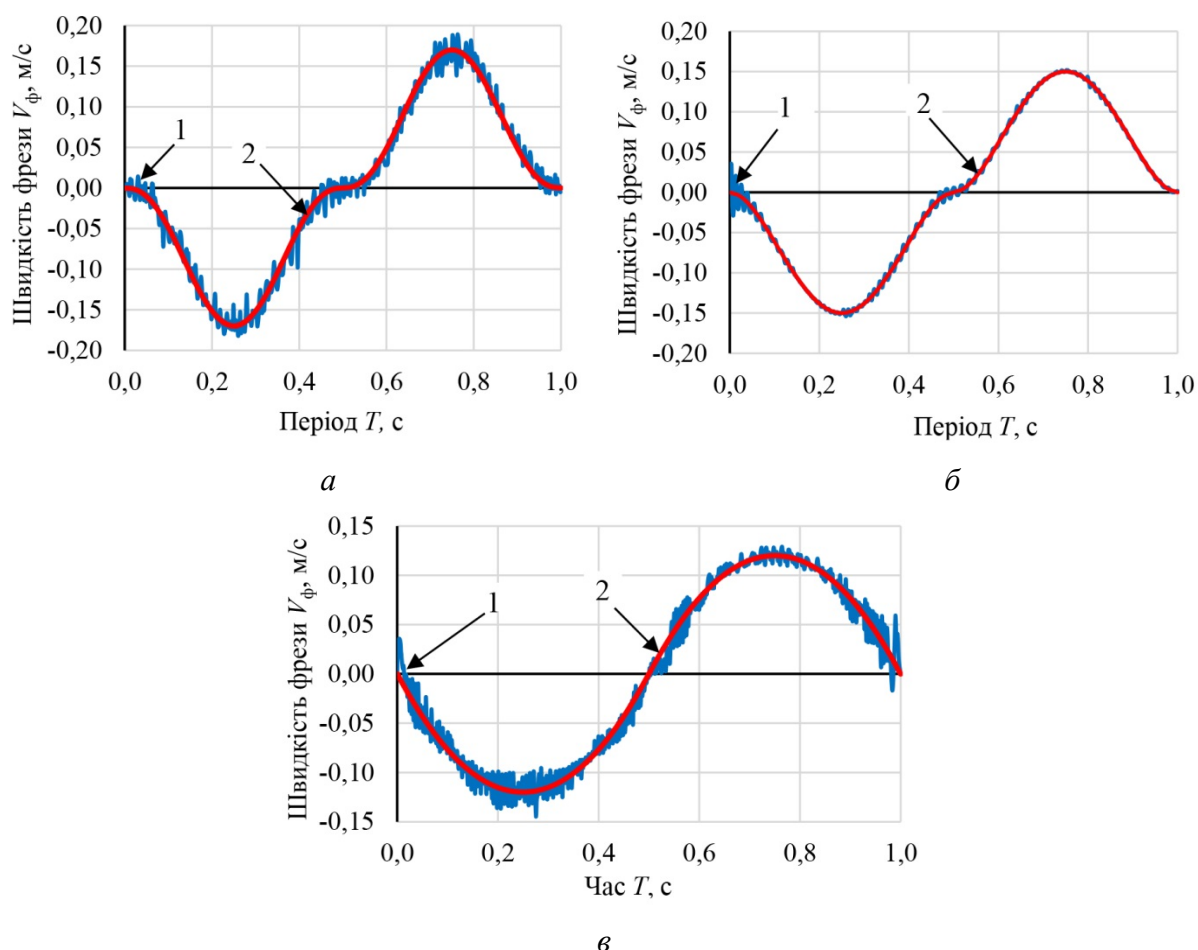


Рис. 6. Порівняльний графік швидкості фрези для законів періодичного руху: «Синусоїда» (а), «Шуна» (б), «Косинусоїда» (в) при віртуальній симуляції (криві 1) і дослідженні аналітично (криві 2)

Джерело: розроблено авторами.

Проведено аналітичні дослідження кінематичних параметрів осьового переміщення циліндричної фрези. Визначено лінійну швидкість фрези для трьох законів періодичного руху, а саме «Синусоїда», «Шуна», «Косинусоїда».

Розкрито метод тривимірного проєктування торцевого кулачка привода фрези, у якому реалізовано рух за відповідним законом періодичного руху. Для моделювання застосовано середовище автоматизованого проєктування Autodesk Inventor. Для об'єктивної оцінки отриманих результатів проведено їхній порівняльний аналіз для випадків аналітичного дослідження та віртуальної симуляції. Встановлено, що розбіжностей між кривими немає, що свідчить про коректність результатів, як теоретичних, так і віртуальної симуляції.

Встановлено, що найменше пікове значення лінійної швидкості фрези є при застосуванні закону руху «Косинусоїда» і становить $V_{\phi} = 0,12$ м/с при її переміщенні на $S = 40$ мм за час повного циклу $T = 1$ с значення. Цей закон руху раціонально застосовувати у пристроях, де технологічні навантаження перевищують інерційні, що прослідковується у розглянутому випадку. За результатами симуляції побудовано 3D-ескіз профілю торцевого кулачка.

Віртуальна симуляція підтвердила працездатність запропонованого пристрою обробки корінців та розкрила особливості руху фрези. Отримані результати будуть враховані при проєктуванні й виготовленні реального дослідного стенда на базі схеми пристрою.

Список використаних джерел

1. Pasanec Preprotić, S., Budimir, I., & Tomić, G. (2015). Evaluation of binding strength depending on the adhesive binding methods. *Acta Graphica*, 1–2, 20–27. <https://hrcak.srce.hr/file/214113>.
2. Pyryev, Y., & Petriaszwili, G. (2009). Modelowanie matematyczne procesu wyrywania arkusza z warstwy klejowej grzbietu książki. *Acta Mechanica et Automatica*, 3, 71–74. <https://pbc.biaman.pl/Content/10012>.
3. Petriaszwili, G. & Pyryev, Y. (2009). Badania eksperymentalne wyrywania arkusza z warstwy klejowej grzbietu książki. *Acta mechanica et automatica*, 3, 68–70. <https://pbc.biaman.pl/Content/10012>.
4. Книш, О., Ререї, І., & Бегень, П. (2020). Дослідження інерційних навантажень пристрою обробки корінців книжкових блоків у машині незшивного скріплення. *Технологія і техніка друкарства*, 4, 42–52. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(70\).2020.231207](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(70).2020.231207).
5. Petriaszwili, G., Janicki, P., & Komarov, S. (2019). Wpływ parametrów pracy noża krążkowego ustawionego mimośrodowo na zmniejszenie trajektorii kontaktu ostrza z krojonym wkładem książkowym. *Przegląd Papierniczy*, 4, 253–257.
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 Engineering and Design GRID 2020*, 229 – 233. <https://doi.org/10.24867/GRID-2020-p24>
7. Іванко, А., & Грищенко, Д. (2010). Пристрій для зрізування корінцевих фальців у книжкових блоках при незшивному клейовому скріпленні. *Комп'ютерні технології друкарства*, 24, 241–247.
8. Іванко, А., & Кухарук Д. (2011). Автоматизоване проєктування пристрою для обробки корінця книжкового блока засобами SolidWorks. *Технологія і техніка друкарства*, 4, 84–87. <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/33495/30041>.
9. Топольницький П. В., Книш О. Б., & Коломієць А. Б. (2023). *Сучасні технології обрізування книжково-журнальних блоків*. УАД.
10. Книш, О. Б. (2021). Обґрунтування способу обробки корінців книжкових блоків циліндричним інструментом з гвинтовою різальною крайкою. *Наукові записки УАД*, 1, 95–104.
11. 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*, 13(2), 101–106. <https://doi.org/10.2478/ama-2019-0014>.
12. Knysh, O., Rehei, I., Ternytskyi, S., Kandiak, N. & Behen P. (2021). Experimental researches of book blocks spine processing by cylindrical milling cutter during perfect binding. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 19(3), 347–355.
13. Randy H. Shih. (2023). *Autodesk Inventor 2024 and Engineering Graphics. An Integrated Approach*. SDC Publications.
14. Полюдов О. М. (2005). *Механіка поліграфічних і пакувальних машин*. УАД.

References

1. Pasanec Preprotić, S., Budimir, I., & Tomić, G. 26 (2015). Evaluation of binding strength depending on the adhesive binding methods. *Acta Graphica*, 1–2, 20–27. <https://hrcak.srce.hr/file/214113>.
2. Pyryev, Y., & Petriaszwili, G. (2009). Modelowanie matematyczne procesu wyrywania arkusza z warstwy klejowej grzbietu książki [Mathematical modeling of the process of sheet peeling from the adhesive layer of a book spine]. *Acta Mechanica et Automatica*, 3, 71–74. pbc.biaman.pl/Content/10012.
3. Petriaszwili, G. & Pyryev, Y. (2009). Badania eksperymentalne wyrywania arkusza z warstwy klejowej grzbietu książki [Experimental studies on peeling a sheet from the adhesive layer of a book spine]. *Acta mechanica et automatica*, 3, 68–70. URL: pbc.biaman.pl/Content/10012.
4. Knysh, O., Rehei, I., & Behen, P. (2020). Doslidzhennia inertsiiinykh 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. [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(70\).2020.231207](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(70).2020.231207).
5. Petriaszwili, G., Janicki, P., & Komarov, S. (2019). Wpływ parametrów pracy noża krążkowego ustawionego mimośrodowo na zmniejszenie trajektorii kontaktu ostrza z krojonym wkładem książkowym [Influence of operating parameters of an eccentrically mounted rotary knife on reducing the contact trajectory of the blade with the book block being cut]. *Przegląd Papierniczy*, 4, 253–257.
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 Engineering and Design GRID 2020*, 229 – 233. DOI:10.24867/GRID-2020-p24.
7. Ivanko, A., & Hrytsenko, D. (2010). Prystrii dlia zrizzuvannia korintsevykh faltsiv u knyzhkovykh blokakh pry nezshyvnomu kleiovomu skriplenni [Device for cutting off spine folds in book blocks during perfect binding]. *Kompiuterni tekhnolohii drukarstva – Computer Technologies in Printing*, 24, 241–247.
8. Ivanko, A., & Kukharuk D. (2011). Avtomatyzovane proektuvannia prystroiu dlia obrobky korintsia knyzhkovoho bloka zasobamy SolidWorks [Automated designing of device for processing of binding edge with facilities of SolidWorks]. *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva – Technology and Technique of Typography*, 4, 84–87. <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/33495/30041>.
9. Topolnytskyi P. V., Knysh O. B., & Kolomiiets A. B. (2023). *Suchasni tekhnolohii obrizzuvannia knyzhkovo-zhurnalnykh blokiv [Modern technologies for trimming book and magazine blocks]*. UAD.
10. Knysh, O. B. (2021). Obgruntuvannia sposobu obrobky korintsiv knyzhkovykh blokiv tsylindrychnym instrumentom z hvyntovoiu rizalnoi kraikoio [Justification of the Method for Processing Book Block Spines Using a Cylindrical Tool with a Helical Cutting Edge]. *Naukovi zapysky UAD – Scientific Papers UAP*, 1, 95–104.
11. 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*, 13(2), 101–106.
12. Knysh, O., Rehei, I., Ternytskii, S., Kandiak, N., & Behen, P. (2021). Experimental researches of book blocks spine processing by cylindrical milling cutter during perfect binding. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 19(3), 347–355.
13. Randy H. Shih. (2023). *Autodesk Inventor 2024 and Engineering Graphics. An Integrated Approach*. SDC Publications.
14. Poliudov O. M. (2005). *Mekhanika polihrafichnykh i pakuvalnykh mashyn [Mechanics of printing and packaging machines]*. UAD.

Отримано 02.06.2025

Oleh Knysh¹, Petro Behen², Yuriy Bilozor³, Oleh Bilyk⁴

¹Doctor 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

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Petro.I.Behen@lpnu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1999-2479>

³Graduate Student of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: yuriybilozor05@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-8660-499X>

⁴Graduate Student of the Department of Computerized complexes of Printing and Packaging Industries
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: olehbilyk13@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0000-3123-5185>

INVESTIGATION OF THE KINEMATICS OF CYLINDRICAL MILLING CUTTER MOTION IN THE PROCESSING OF BOOK BLOCKS IN PERFECT BINDING MACHINES

Perfect binding of book and magazine products is the most common method of binding. This is explained by many advantages. However, it has certain disadvantages. Among them are not always sufficient strength and durability of the binding, as well as poor book opening ability. There are two main directions for improving the quality of perfect binding. The first is improvement of adhesives and the technology of their application to the spine of the book block; the second is improvement of devices and tools used to prepare the spine for adhesive application. Available literature indicates that in the second area, there is an ongoing search for alternative spine processing devices. Each of them is focused on improving processing means - milling cutters, knives, etc. Among others, one method stands out, namely: the use of a tool with a passive drive. This approach involves driving the tool – a cylindrical milling cutter – through its rolling motion along the moving book block. Previous research in this area has focused only on the milling cutter rotational motion.

The article further develops the authors' research on the use of a cam drive to provide additional axial movement of the milling cutter. The proposed device scheme incorporates a fixed end cam. The axial motion of the milling cutter is provided by a lever with a roller that receives movement due to the rotation of the milling cutter. This drive configuration eliminates the need for a separate electromechanical drive for the milling cutter.

For the adopted initial conditions, analytical studies of the kinematic parameters of the milling cutter axial movement were carried out. To objectively evaluate analytical results, a virtual simulation of the milling cutter's motion was performed using the Dynamic Simulation module of CAD Autodesk Inventor. This made it possible to obtain the results of the kinematic parameters through a virtual experiment. A comparative analysis of the results of analytical studies and virtual simulation showed their absolute identity. Based on the results of the studies, a 3D sketch of the end cam was constructed.

Analytical studies of the cylindrical milling cutter axial displacement kinematic parameters lay the groundwork for further research. The next stages involve construction of the physical experimental stand, its installation on the Trendbinder perfect binding machine, and investigation of the energy-force parameters of the process as well as the quality indicators of the perfect binding.

Keywords: book block; perfect binding; periodic motion law; end cam; velocity; acceleration; drive; computer-aided design system.

Fig.: 6. References: 14.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-20-31](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-20-31)

УДК 621.0, 53.08

**Юрій Іванович Адаменко¹, Сергій Володимирович Майданюк²,
Олександр Анатолійович Плівак³, Сергій Вікторович Лапковський⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: yuriy.adamenko@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206>. Researcher ID: ACT-0127-2022

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: maysv3@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. Researcher ID: J-7542-2017

³завідувач науково-дослідної (експериментальної) лабораторії вимірювальної техніки
навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту, асистент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: aplivak@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3680-8485>.

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. Researcher ID: HCH-3837-2022

ПЕРЕВІРКА ТОЧНОСТІ ІНДИКАЦІЇ ШТАНГЕНЦИРКУЛІВ

У сучасному машинобудуванні великий обсяг вимірювань під час виготовлення деталей машин виконується за допомогою штангенциркулів. Важливою є впевненість у тому, що прилади відповідають встановленим вимогам точності, оскільки від цього залежить якість продукту. Тому в умовах машинобудівних підприємств необхідно періодично виконувати перевірку точності індикації штангенциркулів за встановленими процедурами. Проте в чинній нормативній літературі методики наведені в загальному вигляді, і частину питань, пов'язаних із перевіркою точності, оператору доводиться вирішувати самостійно. У статті виконано теоретичний аналіз нормативних документів та проведено експериментальні дослідження, які дозволили розробити практичні рекомендації щодо процедури перевірки точності індикації штангенциркулів, зокрема вибору контрольних точок, кількості повторних вимірювань, ухвалення рішення про відповідність чи невідповідність приладу специфікації.

Ключові слова: штангенциркуль; перевірка точності; метрологічні характеристики; похибки індикації.

Рис.: 7. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Для вимірювання зовнішніх і внутрішніх розмірів, глибин, уступів у машинобудуванні та багатьох інших галузях промисловості широко використовують штангенциркулі. Штангенциркулі відзначаються простотою конструкції та зручністю використання, тому вони є поширеними приладами для контролю розмірів під час виготовлення деталей та складання виробів. Широкий вибір доступних моделей зі спеціалізованими вимірювальними поверхнями робить їх універсальними ручними інструментами. Кожен засіб вимірювальної техніки, який використовується у виробництві, має відповідати встановленим вимогам точності, адже контроль якості є важливою складовою управління виробництвом.

Постановка проблеми. Щоб бути впевненим у правильності результату вимірювань за показами приладу, необхідно підтримувати його в робочому стані, акуратно виконувати вимірювання та періодично проводити калібрування. Повірку та калібрування складних приладів здійснюють відповідні профільні метрологічні лабораторії та сервісні центри виробників. Водночас на промислових підприємствах, де експлуатують засоби вимірювання, періодично виконують перевірку їхніх метрологічних характеристик для встановлення їх відповідності специфікації на прилад. Проміжні перевірки, необхідні для підтримання впевненості у працездатності обладнання, потрібно проводити відповідно до встановленої процедури.

В Україні довгий час діяли два стандарти, які регулювали питання конструювання, виготовлення, експлуатації та повірки штангенциркулів, а саме: «ДСТУ ГОСТ 166:2009 Штангенциркули. Технические условия» [1] та «ДСТУ ГОСТ 8.113:2009 ГСИ. Штангенциркули. Методика поверки» [2]. Проте стандарт [1] втратив чинність з 01.01.2019 року, а стандарт [2] з 01.01.2022 року.

Натомість з 01.01.2019 року набрав чинності міжнародний стандарт «ДСТУ EN ISO 13385-1:2018 Технічні вимоги до геометричних параметрів продукції (GPS). Прилади для лінійних та кутових вимірювань. Частина 1. Штангенциркулі. Проектні та метрологічні характеристики» [3]. У 2022 році в Україні було введено в дію ще два міжнародних стандарти: «ДСТУ EN ISO 14978:2022 Геометричні специфікації виробу (GPS). Загальні концепції та вимоги до вимірювального обладнання GPS» [4] та «ДСТУ EN ISO 13385-1:2022 Геометричні специфікації виробу (GPS). Обладнання для вимірювання розмірів. Частина 1. Конструкція та метрологічні характеристики штангенциркулів» [5].

Стандарт [4] формулює терміни та визначення характеристик вимірювального обладнання GPS, зокрема, штангенциркулів, мікрометрів, вимірювальних головок, встановлює загальні вимоги до їхніх конструктивних елементів та калібрування, а також дає рекомендації щодо розробки та змісту стандартів для вимірювального обладнання GPS. Використання стандарту дає можливість уникнути багаторазових повторів у стандартах ISO для конкретного вимірювального обладнання GPS. Цей стандарт застосовують у компаніях як інструмент для правильного вибору вимірювального обладнання та його характеристик, що економить час і спрощує комунікацію між виробником та замовником.

Зараз в Україні одночасно діють стандарти, прийняті на базі ISO 13385-1:2011 та ISO 13385-1:2018, які суттєво відрізняються від стандартів ДСТУ ГОСТ [1; 2], а також відрізняються один від одного в питаннях, що стосуються перевірки метрологічних характеристик штангенциркулів. Крім того, обидва вказані стандарти прийняті мовою оригіналу, тобто англійською, і українською мовою не перекладені, що не виключає персональних інтерпретацій спеціалістів.

Таким чином, машинобудівні підприємства країни потребують наявності чітких і зрозумілих процедур оцінки точності приладів, що знаходяться в експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними причинами виникнення похибок під час вимірювання штангенциркулями є наявність похибки Аббе через те, що лінія вимірювання не збігається з лінією шкали та похибки встановлення вимірювальних поверхонь приладу відносно поверхонь деталі, а для ноніусних штангенциркулів, ще й похибка налаштування нульової точки та похибка зчитування через наявність паралакса. Крім того, для штангенциркулів, що експлуатуються, причинами виникнення похибок є можливі механічні пошкодження та зношення робочих поверхонь губок [6].

Під час встановлення метрологічних характеристик штангенциркулів, згідно [3; 5], визначають окремо похибку часткового контакту поверхні та похибку зсуву шкали. Похибка часткового контакту виявляється під час вимірювання кінцевих мір губками для вимірювання зовнішніх поверхонь. Вимірювання призначені для виявлення комбінації похибок штангенциркуля, включаючи похибки шкали, вплив прикладеної вимірювальної сили, зазор між штангою і рамкою, геометричні похибки штанги та вплив паралельності і площинності зовнішніх вимірювальних поверхонь. Похибку часткового контакту поверхні встановлюють шляхом вимірювання розмірів у кількох контрольних точках, розташованих по всьому діапазону основної шкали, а для ноніусних штангенциркулів, також, і по всьому діапазону шкали ноніуса.

Вимірювання починають з встановлення нульової точки. Для цього вимірювальні поверхні губок для зовнішніх вимірювань приводять в контакт, і в цьому положенні фіксують нульову точку. Нульова точка вважається зафіксованою і не змінюється протягом усього процесу оцінки метрологічних характеристик штангенциркуля.

Під час вимірювання похибки часткового контакту поверхні контрольні точки можна вибирати довільно. Згідно з рекомендаціями стандарту [5] контрольні точки повинні бути розподілені якомога рівномірніше в межах діапазону вимірювання штангенциркуля. При цьому принаймні одна контрольна точка повинна бути на 90 % або більше від діапазону вимірювання. Варто зазначити, що в різних чинних нормативних документах, які широко застосовуються у світовій індустрії, рекомендації щодо вибору кількості контрольних точок дещо відрізняються. Мінімальну кількість контрольних точок за стандартами [5; 7] наведено в табл. 1. Нульова точка не зараховується до мінімальної кількості контрольних точок, наведених у табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість контрольних точок для визначення похибки часткового контакту поверхні

Діапазон вимірювання штангенциркуля менший або дорівнює, мм	Мінімальна кількість контрольних точок за ISO 13385-1:2019 [5]	Мінімальна кількість контрольних точок за ASME B89.1.14-2018 [7]
150	5	3
300	6	4
1000	7	5
Понад 1000	8	–

Джерело: складено авторами.

Компанія esz AG, ФРН [8] під час калібрування штангенциркулів використовує контрольні точки, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Точки для калібрування штангенциркуля [8]

Діапазон вимірювання менший або дорівнює, мм	Кількість точок	Розмір, мм
150	3	0 / 41,3 / 131,4
200	4	0 / 41,3 / 131,4 / 291,4
300	4	0 / 41,3 / 131,4 / 291,4
400	5	0 / 41,3 / 131,4 / 291,4 / 381,4
500	6	0 / 41,3 / 131,4 / 291,4 / 381,4 / 461,4

Джерело: складено авторами.

Причому міри 41,3 і 131,4 мм є спеціальними, а більші розміри отримують набором мір:

291,4 мм: 100 мм+131,4 мм+60 мм;

381,4 мм: 100 мм+131,4 мм+60 мм+90 мм;

461,4 мм: 100 мм+131,4 мм+60 мм+90 мм+80 мм.

У роботі [6] для вимірювання похибки часткового контакту поверхні запропоновано вибирати від 5 до 10 контрольних точок для покриття діапазону вимірювання приладу, розподілених приблизно на однаковій відстані одна від одної. Кількість точок калібрування залежить від ціни поділки шкали чи дискретності цифрового приладу. Так, для штангенциркуля з ціною поділок 0,01 мм і 0,02 мм рекомендується вибрати 10 точок калібрування, а для поділок шкали 0,05 мм і 0,1 мм може бути від 5 до 10 точок. При цьому мають бути точки, які відповідають мінімуму шкали та максимуму шкали або значення, близьке до максимуму. Наприклад, для калібрування цифрового штангенциркуля 150 мм і роздільною здатністю 0,01 мм було обрано такі контрольні точки: 0 мм, 10 мм, 30 мм, 50 мм, 70 мм, 90 мм, 110 мм, 130 мм і 150 мм.

Для визначення похибки зсуву шкали кожний з типів вимірювань (вимірювання отворів, глибини, висоти уступу тощо) має бути перевірений як мінімум з однією контрольною точкою [5]. У роботі [6] за замовчуванням рекомендовано брати дві контрольних точки.

Таким чином, питання вибору кількості контрольних точок не є однозначним і потребує від оператора прийняття самостійного рішення з урахуванням особливостей вимірювання.

Стандарти [3], [5], [7] не регламентують кількість повторних вимірювань у контрольних точках під час проведення оцінки точності штангенциркуля. У роботі [6] рекомендовано в кожній точці калібрування при вимірюванні зовнішніми губками виконувати по два повторних вимірювання, а потім випадково вибрати дві точки та провести в них по десять повторних вимірювань для визначення повторюваності. Причому під час проведення повторних вимірювань положення блока мір слід змінювати вздовж контактної поверхні губок, щоб оцінити, наявність зазору між рухомою рамкою і штангою штангенциркуля.

Під час вимірювання похибки зсуву шкали штангенциркуля для при вимірюванні внутрішніх поверхонь у двох точках калібрування в межах діапазону вимірювання рекомендовано виконувати по два або три повторних вимірювання.

Для встановлення відповідності або невідповідності специфікаціям слід дотримуватись правила прийняття рішення, що додається до специфікації на прилад. Якщо у специфікації правило прийняття рішення не вказане, то, за замовчуванням, виміряні значення порівнюються з гранично допустимими похибками E_{MPE} (для часткової похибки контакту поверхні) чи S_{MPE} (для похибки зсуву шкали) [5].

Значення гранично допустимої похибки MPE (Maximum Permissible Error) для штангенциркулів з довжиною вимірювання до 500 мм наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Значення MPE для штангенциркулів [5]

Довжина вимірювання, l , мм	Ціна поділки аналогової шкали чи дискретності цифрового пристрою					
	0,01 мм		0,02 мм		0,05 мм	
	E_{MPE} , мкм	S_{MPE} , мкм	E_{MPE} , мкм	S_{MPE} , мкм	E_{MPE} , мкм	S_{MPE} , мкм
$0 < l \leq 50$	± 20	± 30	± 20	± 40	± 50	± 50
$50 < l \leq 100$	± 30	± 50	± 40	± 60	± 50	± 100
$100 < l \leq 200$	± 30	± 50	± 40	± 60	± 100	± 100
$200 < l \leq 300$	± 40	± 60	± 40	± 60	± 100	± 100
$300 < l \leq 400$	± 40	± 60	± 40	± 60	± 100	± 100
$400 < l \leq 500$	± 50	± 70	± 60	± 80	± 100	± 100

Джерело: складено авторами.

Згідно з [5] значення гранично допустимих похибок MPE не можуть бути меншими за крок дискретності цифрового відлікового пристрою або ціни поділки шкали на круговій шкалі або шкалі ноніуса. Значення MPE є функцією виміряної довжини, а не діапазону вимірювання штангенциркуля.

Для значень MPE, наведених у табл. 3, за правило прийняття рішення щодо встановлення відповідності чи невідповідності прийняте просте прийняття та відхилення. При цьому індекс вимірювальної спроможності St повинен дорівнювати чотирьом, тобто невизначеність вимірювання не повинна перевищувати четверту частину допуску.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Стандарти [3; 5] дають загальні рекомендації щодо змісту та етапів виконання вимірювань і оцінки їхніх результатів, проте частину питань спеціалісту, що проводить перевірку індикації приладу, доводиться вирішувати самостійно. Отже, очевидно, є потреба в уточненні методик, що виникли у зв'язку з переходом на нові стандарти ISO, зокрема щодо вибору контрольних точок, кількості вимірювань у контрольних точках та прийняття рішення про встановлення відповідності специфікації.

Метою статті є розробка рекомендацій для уточнення методики перевірки індикації штангенциркулів, зокрема, вибір контрольних точок, кількості вимірювань у контрольних точках, прийняття рішення щодо встановлення відповідності специфікації. Це спростить процедуру виконання вимірювань та дозволить прийняти обґрунтовані рішення під

час перевірки точності штангенциркулів. Проведення перевірки надає впевненості, що прилади відповідають встановленим вимогам точності, та забезпечують необхідну якість вимірювання деталей машин.

Виклад основного матеріалу. Для розробки рекомендацій щодо уточнення методики перевірки індикації штангенциркулів був виконаний теоретичний аналіз нормативних документів, що використовуються в машинобудуванні та інших галузях промисловості, проведені експериментальні дослідження точності індикації штангенциркуля та виконана обробка отриманих результатів, що дозволило сформулювати відповідні висновки.

На основі рекомендацій, наведених в роботах [3; 5; 7], а також враховуючи досвід метрологічних лабораторій [7; 8; 10], було розроблено рекомендації для вибору контрольних точок для штангенциркулів з цифровою індикацією (табл. 4).

Таблиця 4 – Вибір розмірів контрольних точок цифрових штангенциркулів
розміри в міліметрах

Діапазон вимірювання	Номер контрольної точки						
	0	1	2	3	4	5	6
125	0	25	50	75	100	125	
150	0	30	60	90	120	150	
200	0	30	60	90	120	150	200
250	0	40	80	120	150	200	250
300	0	50	100	150	200	250	300

Джерело: складено авторами.

При складанні табл. 4 було прийнято, що нульова точка дорівнює мінімальному значенню діапазону вимірювання, тобто нулю. Остання точка відповідає максимуму діапазону вимірювання штангенциркуля. Кількість контрольних точок відповідає рекомендаціям [5], точки розподілені рівномірно по всьому діапазону вимірювання. Частину отриманих значень було округлено до цілих чисел, для зручності під час складання блоку мір. Для штангенциркулів з ноніусним відліковим пристроєм необхідно рівномірно встановити дробову частину розміру в межах діапазону його вимірювання. Наприклад, розміри можна утворити шляхом додавання до розмірів № 1-4 (табл. 4) мір з розмірами 1,3 мм; 1,8 мм; 1,4 мм; 1,6 мм відповідно (табл. 5).

Таблиця 5 – Вибір розмірів контрольних точок ноніусних штангенциркулів
розміри в міліметрах

Діапазон вимірювання	Номер контрольної точки						
	0	1	2	3	4	5	6
125	0	26,3	51,8	76,4	101,6	125	
150	0	31,3	61,8	91,4	121,6	150	
200	0	31,3	61,8	91,4	121,6	150	200
250	0	41,3	81,8	121,4	151,6	200	250
300	0	51,3	101,8	151,4	201,6	250	300

Джерело: складено авторами.

Для експериментальної перевірки точності індикації було вибрано цифровий штангенциркуль з діапазоном вимірювання 0-150 мм і дискретністю цифрового відлікового пристрою 0,01 мм. Перед виконанням експерименту вимірювальні поверхні штангенциркуля було очищено від забруднень і перевірено на наявність пошкоджень та надмірного зношення. Вимірювальні поверхні були знежирені папером без ворсу, змоченим в уайт-спіриті. Рамка по штанзі переміщувалась вільно, і при цьому не зміщувалась під дією власної ваги у вертикальному положенні штанги.

Експерименти виконувались досвідченим оператором, який має достатні навички роботи зі штангенциркулем. Особлива увага приділялась тому, щоб кожне вимірювання виконувалось із прикладанням мінімальної постійної сили. Необхідне положення вимірювальних поверхонь штангенциркуля відносно поверхонь мір ретельно встановлювалось, уникаючи зазорів та перекосів.

Температура в приміщенні вимірювалась цифровим термометром з дискретністю $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Під час проведення експерименту температура у приміщенні знаходилась у діапазоні $(20 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Штангенциркуль, кінцеві міри довжини та інше необхідне приладдя втримувалось в одному приміщенні протягом не менше однієї години для вирівнювання температури. Вимірювання здійснювалось з використанням термоізоляційних рукавичок.

На початку експерименту губки для вимірювання зовнішніх поверхонь були зведені до контакту і в цьому положенні встановлено нульову точку. В експерименті використовувався набір кінцевих мір довжини 3 класу точності за ДСТУ ГОСТ 9038.

Для вимірювання похибки часткового контакту поверхні $E_{\text{МРЕ}}$ цифрового штангенциркуля відповідно до табл. 4 були вибрані наступні контрольні точки, що лежать у межах діапазону вимірювання: 30 мм, 60 мм, 90 мм, 120 мм і 150 мм (рис. 1). У точках з розмірами 30 мм і 150 мм було виконано по три окремих вимірювання: одне поблизу штанги, друге в середній частині губок і третє поблизу кінчиків губок (рис. 2).

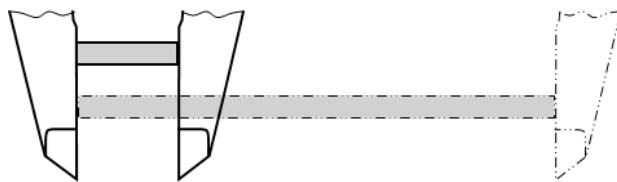


Рис. 1. Схема вимірювання в межах діапазону вимірювання шкали [5]

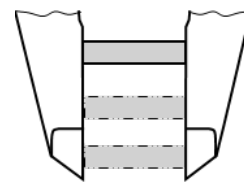


Рис. 2. Схема вимірювання по довжині губок [5]

Для визначення похибки лінійного контакту, яка є наслідком локального зношення чи відхилення від паралельності губок, була використана міра циліндричної форми діаметром 15 мм. Вимірювання виконувались в різних положеннях вздовж зовнішніх вимірювальних поверхонь перпендикулярно до площини губок (рис. 3).

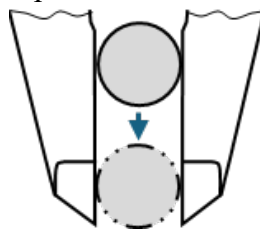


Рис. 3. Схема вимірювання лінійного контакту [5]

Похибка зсуву $S_{\text{МРЕ}}$ виникає через те, що налаштування на нуль здійснюється за губками для вимірювання зовнішніх поверхонь, а вимірювання розмірів здійснюється іншими вимірювальними поверхнями. Типові похибки зсуву шкали виникають під час використання внутрішніх вимірювальних поверхонь для вимірювання отворів, глибиноміра та поверхонь штангенциркуля для вимірювання ступінчастих поверхонь.

Для перевірки похибки зсуву для внутрішніх вимірювальних поверхонь була використана установна кільцева міра діаметром 50 мм (рис. 4). Під час вимірювання отворів малих діаметрів штангенциркулями з перехрещеними ножовими кромками може виникнути додаткова похибка зсуву. Величина похибки залежить від зазору між вимірювальними поверхнями губок та товщини граней ножа губок. Похибка зсуву через схрещені внутрішні вимірювальні поверхні ножа перевірялись шляхом вимірювання установчої кільцевої міри діаметром 5 мм (рис. 5).

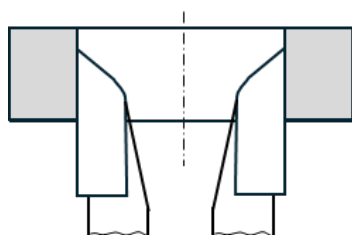


Рис. 4. Схема вимірювання отвору [5]

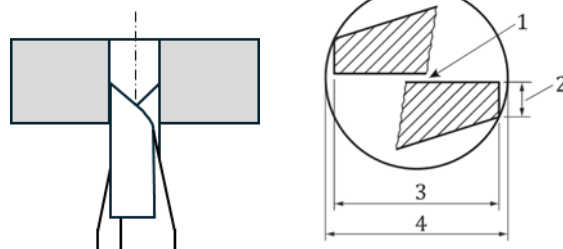


Рис. 5. Схема вимірювання отвору малого діаметра [5]:
1 - зазор між губками; 2 - товщина граней губок;
3 - виміряний розмір; 4 - розмір отвору

Для перевірки похибки зсуву шкали глибиноміра та поверхонь, призначених для вимірювання висоти уступу було використано плоскопаралельну кінцеву міру розміром 20 мм та плоску пластину, на яку встановлювалась міра (рис. 6, 7).

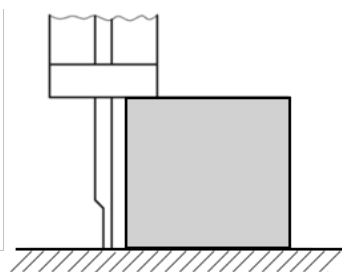


Рис. 6 – Схема вимірювання глибиноміром [5]



Рис. 7 – Схема вимірювання уступу [5]

Результати вимірювань вносились у табл. 6.

Таблиця 6 – Результати вимірювання

Перевірка	Розмір міри, мм	Виміряний розмір, l_i , мм	E_{MPE}/S_{MPE} , мм	l_{10} , мм	s_{10} , мм	MPE, $\pm$ мм	Відповідність так/ні
1	2	3	4	5	6	7	8
Зовнішні поверхні	30 ¹	30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00	0	30,000	0	0,02	так
	30 ²	30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00	0	30,000	0	0,02	так
	30 ³	30,01; 30,00; 30,00; 30,00; 30,01; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00; 30,00	+0,01	30,002	0,004	0,02	так
	60	60,00; 60,00; 60,01; 60,00; 60,00; 60,01; 60,00; 60,01; 60,00; 60,01	+0,01	60,004	0,005	0,03	Так
Зовнішні поверхні	90	90,00; 90,00; 90,00; 89,99; 90,00; 90,00; 90,00; 90,00; 90,00; 90,00	0	89,999	0,003	0,03	так
	120	119,99; 120,00; 120,00; 119,99; 120,00; 120,00; 120,00; 119,99; 120,00; 120,00	-0,01	119,997	0,005	0,03	так
	150 ¹	150,00; 150,01; 150,01; 150,00; 150,00; 150,01; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00	+0,01	150,003	0,005	0,03	так
	150 ²	150,01; 150,01; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00; 150,01; 150,00; 150,00	+0,01	150,004	0,005	0,03	так
	150 ³	150,00; 150,01; 150,01; 150,01; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00; 150,00	+0,01	150,003	0,005	0,03	так

Закінчення табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8
Лінійний контакт	Ø15	15,01; 15,01; 15,00; 15,00; 15,00; 15,00; 15,00; 15,00; 15,00; 15,00	+0,01	15,002	0,004	0,06	так
Внутрішні поверхні	Ø50	50,01; 50,01; 50,02; 50,01; 50,01; 50,02; 50,01; 50,01; 50,02; 50,01	+0,02	50,013	0,005	0,03	так
	Ø5	4,98; 4,98; 4,99; 4,99; 4,99; 4,98; 4,98; 4,98; 4,99; 4,99	-0,02	4,985	0,005	0,03	так
Глибиномір	20	20,00; 19,99; 20,01; 20,01; 20,00; 20,01; 20,01; 20,00; 20,00; 20,01	-0,01 +0,01	20,004	0,007	0,03	так
Уступ	20	20,01; 20,02; 20,00; 20,01; 20,00; 20,01; 20,00; 20,01; 20,00; 20,00	+0,02	20,006	0,007	0,03	так

¹ – вимірювання поблизу штанги;

² – вимірювання посередині губок;

³ – вимірювання поблизу кінчиків губок;

E_{MPE} – похибка часткового контакту поверхні (по трьох точках);

S_{MPE} – похибка зсуву шкали (по трьох точках);

I_{10} – середнє арифметичне відхилення (по десяти точках);

S_{10} – середнє квадратичне відхилення (по десяти точках);

MPE – гранично допустима похибка.

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до [3] і [5] усереднення кількох показів або інша обробка даних під час визначення відповідності специфікаціям не допускається, відповідно розмір кожної вимірюваної величини має оцінюватись одним тестовим значенням. При цьому вплив повторюваності включено у випробування на часткову помилку контакту поверхні.

Проте у даній роботі досліджувався вплив кількості вимірювань у кожній контрольній точці. Відповідно у кожній точці було виконано по 10 вимірювань. Обробка результатів здійснювалась наступним чином. Часткова похибка контакту розрахована як алгебраїчна різниця між показами штангенциркуля та номінальним розміром кінцевої міри довжини чи блоку мір. Похибка лінійного контакту розраховувалась як діапазон значень, виміряних вздовж робочих поверхонь губок для зовнішніх вимірювань.

Серед трьох перших повторних вимірювань у кожній контрольній точці брали ту, яка має найбільше відхилення від номінального розміру міри. Відповідно визначали похибку часткового контакту поверхні E_{MPE} чи похибку зсуву S_{MPE} . Для порівняння додатково за результатами десяти вимірювань визначалось середнє арифметичне значення та величина, що характеризує розсіювання розмірів, а саме, середньоквадратичне відхилення. Як показує аналіз даних табл. 6, вимірювання десяти точок підтверджує повторюваність результатів вимірювання.

Для остаточного простого прийняття рішення щодо відповідності чи невідповідності в стандартах [3; 5] було висловлене застереження, що невизначеність вимірювання не має перевищувати чверті допуску. Тому розрахуємо невизначеність вимірювання для фактичних умов проведення експерименту. Визначимо джерела похибок, які варто включити для розрахунку невизначеності вимірювання. Скористаємось загальноприйнятою практикою розрахунку бюджету невизначеності, яка використовується для штангенциркулів [7].

1. Усі похибки приладу, зокрема зміщення Аббе, роздільна здатність, паралакс, пружні деформації повторюваність тощо, є частиною того, що перевіряється, а не включається в невизначеність.

2. Штангенциркуль є ручним вимірювальним приладом, тому оператор обов'язково має бути включений у вимірювальну систему. Оператор має достатні навички роботи зі штангенциркулем, а вимірювання ретельно підготовлені і виконані, тому будь-які похибки пов'язані з його діями, як фактор, що впливає на невизначеність вимірювань, не включаються.

3. Невизначеність, пов'язана зі стандартами на допоміжне приладдя: кінцеві міри, ступінчасті калібри чи установчі кільця, які використовуються при випробуваннях, як правило, включають як фактори, що вносять внесок у невизначеність вимірювання.

Під час вимірювання плоскопаралельні кінцеві міри довжини використовувались не за каліброваними, а номінальними значеннями. Оскільки кінцеві міри довжини, які використовувались при вимірюваннях, відповідають 3 класу точності за ДСТУ ГОСТ 9038, відповідно внесок від похибок мір слід включити у бюджет невизначеності.

4. Метрологічні характеристики повинні бути визначені при температурі 20 °C або мати номінальний робочий стан із визначеним температурним інтервалом, наприклад від 18 до 22 °C [4]. У стандартах [1; 2] границя допустимої похибки штангенциркулів задана для температури навколишнього середовища (20 ± 5) °C. У цьому випадку коригування результатів калібрування залежно від температури вимірювань не передбачено. Проте у нашому випадку усі значення максимально допустимої похибки МРЕ застосовуються за номінальних умов експлуатації для температури 20 °C точно. Тому значення випробувань відповідно до [5] повинні бути скориговані до температури 20 °C, щоб отримати похибку показів, яку штангенциркуль дав би, якби випробування проводилося при 20 °C. Якщо температурна корекція до 20 °C не виконується, то похибка може бути включена в оцінку невизначеності вимірювання. У звичайній практиці [7] поправка на температуру не вноситься, що має враховуватися в умовах невизначеності як впливаючий фактор.

Отже, визначимо бюджет невизначеності за таких умов:

- а) вимірювана довжина: 150 мм;
- б) блок кінцевих мір: 150 мм = 100 мм + 50 мм;
 - допуск на міру 100 мм: клас 3 (±2,5 мкм);
 - допуск на міру 50 мм: клас 3 (±1,6 мкм);
- в) діапазон температур під час випробування: (20 ± 2) °C;
- г) різниця температур штангенциркуля і мір, не більше: 0,6 °C;
- д) матеріал штангенциркуля нержавіюча сталь серії 440, коефіцієнт лінійного розширення (КЛР), (0-100 °C) : $\alpha = 10,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$;
- е) матеріал кінцевих мір довжини невідомий, але за ДСТУ ГОСТ 9038:2009 відомо, що коефіцієнт лінійного розширення сталених мір складає 10,5-12,5 мкм на 1 м і 1 °C. Приймаємо значення КЛР мір максимально віддалене від КЛР штангенциркуля, тобто $\alpha = 12,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Для плоскопаралельних кінцевих мір довжини 100 мм і 50 мм класу точності 3 передбачається прямокутний закон розподілу з границями 2,5 мкм і 1,6 мкм відповідно (табл. 7).

Внесок від відхилення температури від номінальної 20 °C, закон розподілу прямокутний:

$$\Delta L = L(20 - T)\Delta\alpha,$$

де L – номінальна довжина;

T – температура;

$\Delta\alpha$ – різниця КЛР між кінцевими мірами та штангенциркулем

$$\Delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2| = |10,1 - 12,5| = 2,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C};$$

$$\Delta L = (150 \text{ мм})(2^\circ\text{C})(2,4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}) = 0,72 \text{ мкм}.$$

Внесок від різниці температур між мірами і штангенциркулем, закон розподілу прямокутний:

$$\Delta L = L \Delta T \alpha,$$

де L – номінальна довжина;

ΔT – різниця між температурами кінцевих мір та штангенциркуля;

α – середнє арифметичне КЛР матеріалу кінцевих мір та штангенциркуля.

$$\Delta L = (150 \text{ мм})(0,6 \text{ }^\circ\text{C})(11,3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}) = 1,02 \text{ мкм}$$

Невизначеність типу А – не враховується.

Сумарна стандартна невизначеність:

$$u_c = \sqrt{u_{CB}^2} = \sqrt{1,45^2 + 0,92^2 + 0,42^2 + 0,59^2} = 1,86 \text{ мкм}.$$

Розширена невизначеність для коефіцієнта покриття $k=2$ ($P=95\%$):

$$U = k \times u_c = 2 \times 1,86 = 3,72 \text{ мкм}$$

Таблиця 7 – Бюджет невизначеності

Джерело невизначеності	Значення, мкм	Тип	Розподіл ймовірностей	Дільник	Стандартна невизначеність, мкм
Допуск міри 100 мм	2,50	В	прямокутний	1,73	1,45
Допуск міри 50 мм	1,60	В	прямокутний	1,73	0,92
Відхилення температури від номінальної 20 °С	0,72	В	прямокутний	1,73	0,42
Різниця температур між мірами і штангенциркулем	1,02	В	прямокутний	1,73	0,59

Максимально допустима часткова похибка контакту поверхні для розміру 150 мм складає 30 мкм (табл. 3). Якщо за замовчуванням використовується правило простого прийняття 4:1 відповідно до [5], тоді розширена невизначеність U повинна бути меншою за 25 % від значення МРЕ. У нашому випадку похибка 3,72 мкм становить 12,4 % від значення МРЕ, і тому встановлення відповідності може бути прийняте простим рішенням. За необхідності невизначеність вимірювання можна зменшити за рахунок більш жорсткого дотримання температурного режиму та використання плоскопаралельних мір довжини більш точного класу.

Таким чином, порівнявши дійсні відхилення з величинами гранично допустимих похибок $E_{\text{ЕМР}}$ та $S_{\text{ЕМР}}$, можна стверджувати, що перевірка точності індикації штангенциркуля показала його відповідність специфікації, а відповідно і придатність до роботи.

У протилежному випадку необхідно було б перевірку повторити або штангенциркуль відправити на ремонт, або вилучити з експлуатації чи збільшити невизначеність у використанні приладу.

Висновки. Методика оцінки точності індикації штангенциркулів за ISO 13385-1:2019 суттєво відрізняється від звичної методики за ДСТУ ГОСТ 8.113:2009 як за переліком і змістом процедур, так і за видами та значеннями гранично допустимих похибок.

В чинних нормативних документах різних країн кількість контрольних точок штангенциркуля суттєво відрізняється, наприклад, для штангенциркуля з діапазоном вимірювання 0-150 мм рекомендована кількість точок складає від 3 до 10. Очевидно, що більша кількість точок дає більш об'єктивну картину, але призводить до збільшення витрат часу на процедуру перевірки та, як наслідок, удорожчання процедури перевірки. З урахуванням критеріїв для вибору розміру контрольних точок для визначення часткової похибки контакту розроблені рекомендації, представлені в табл. 3.

Кількість вимірювань у кожній контрольній точці у різних методиках також відрізняється і становить: 1, 2, 3, 10. Рішення щодо відповідності приймається за значенням одного розміру з максимальним відхиленням від номінального розміру або за середнім арифметичним, не звертаючи уваги на заборону ISO 13385-1:2019 усереднювати чи іншим чином обробляти результати вимірювань. На наш погляд, достатньо виконати три повторних вимірювання у різних положеннях по довжині губок і внести в протокол значення з найбільшим відхиленням від номінального розміру.

Граничні допустимі похибки вимірювання є досить великими, наприклад, для штангенциркуля з діапазоном вимірювання 0-250 мм і з дискретністю цифрового пристрою 0,01 мм, залежно від довжини вимірювання, допустима похибка знаходиться в діапазоні від 0,02 до 0,03 мм, що у 2-3 рази перевищує цифровий крок приладу. Очевидно, є доцільним застосування простого правила прийняття рішення за одним значенням у контрольній точці. Розрахунок невизначеності вимірювання це підтверджує.

На підставі наведеного вище можна зазначити, що розроблені рекомендації дозволяють скоротити витрати часу та собівартість процедури проведення перевірки точності індикації штангенциркулів, що, у свою чергу, приведе до підвищення якості контролю деталей машин при їх виготовленні, за рахунок відсутності невірно бракованих та невірно прийнятих деталей.

Список використаних джерел

1. Держстандарт України. (2009). *ГСН. Штангенциркули. Методика поверки*. (ДСТУ ГОСТ 8.113:2009).
2. Держстандарт України. (2009). *Штангенциркули. Технические условия*. (ДСТУ ГОСТ 166:2009).
3. Держстандарт України. (2018). *Технічні вимоги до геометричних параметрів продукції (GPS). Прилади для лінійних та кутових вимірювань. Частина 1. Штангенциркулі. Проектні та метрологічні характеристики (EN ISO 13385-1:2011, IDT; ISO 13385-1:2011, IDT)*. (ДСТУ EN ISO 13385-1:2018).
4. Держстандарт України. (2022). *Геометричні специфікації виробу (GPS). Загальні концепції та вимоги до вимірювального обладнання GPS (EN ISO 14978:2018, IDT; ISO 14978:2018, IDT)*. (ДСТУ EN ISO 14978:2022).
5. Держстандарт України. (2022). *Геометричні специфікації виробу (GPS). Обладнання для вимірювання розмірів. Частина 1. Конструкція та метрологічні характеристики штангенциркулів (EN ISO 13385-1:2019, IDT; ISO 13385-1:2019, IDT)*. (ДСТУ EN ISO 13385-1:2022).
6. Centro Español de Metrología – official website. <https://www.cem.es/es>.
7. American Society of Mechanical Engineers [ASME]. (2018). *Calipers*. (ASME B89.1.14-2018).
8. Esz AG – official website. <https://www.esz-ag.de>.
9. International Organization for Standardization. (2012). *Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces (ISO/TR 14253-6:2012)*.
10. *Accuracy and Calibration of Calipers*. (2018). Mitutoyo America Corporation. <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/15003A.pdf>.

References

1. Derzhstandart Ukrainy. [State Standard of Ukraine.] (2009). *HSY. Shtanhentsyrkuly. Metodyka poverky. (DSTU HOST 8.113:2009)- Calipers. Calipers verification method (DSTU GOST 8.113:2009)*.
2. Derzhstandart Ukrainy. [State Standard of Ukraine.] (2009) *Shtanhentsyrkuly. Tekhnicheskyye usloviya. (DSTU HOST 166:2009) - Calipers. Technical specifications. (DSTU GOST 166:2009)*.
3. Derzhstandart Ukrainy. [State Standard of Ukraine.] (2018). *Tekhnichni vymohy do heometrychnykh parametriv produktsii (GPS). Prylady dlia liniinykh ta kutovykh vymiriuvan. Chastyna 1. Shtanhentsyrkuli. Proektni ta metrolohichni kharakterystyky - Instruments for linear and angular measurements. Part 1: Calipers. Design and metrological characteristics (EN ISO 13385-1:2011, IDT; ISO 13385-1:2011, IDT)*. (DSTU EN ISO 13385-1:2018).

4. Derzhstandart Ukrainy. [State Standard of Ukraine.] (2022). *Heometrychni spetsyfikatsii vyrobu (GPS). Zahalni kontseptsii ta vymohy do vymiriuvannia obladnannia GPS* - Geometric product specifications (GPS). General concepts and requirements for GPS measuring equipment (EN ISO 14978:2018, IDT; ISO 14978:2018, IDT). (DSTU EN ISO 14978:2022).
5. Derzhstandart Ukrainy. [State Standard of Ukraine.] (2022). *Heometrychni spetsyfikatsii vyrobu (GPS). Obkladnannia dlia vymiriuvannia rozmiriv. Chastyna 1. Konstruktsiia ta metrolohichni kharakterystyky shtanhentsyrkuliv* - Geometric product specifications (GPS). Equipment for measuring dimensions. Part 1: Design and metrological characteristics of calipers (EN ISO 13385-1:2019, IDT; ISO 13385-1:2019, IDT). (ДСТУ EN ISO 13385-1:2022).
6. Centro Español de Metrología – official website. <https://www.cem.es/es>.
7. American Society of Mechanical Engineers [ASME]. (2018). *Calipers*. (ASME B89.1.14-2018).
8. Esz AG – official website. <https://www.esz-ag.de>.
9. International Organization for Standardization. (2012). *Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment. Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces* (ISO/TR 14253-6:2012).
10. *Accuracy and Calibration of Calipers*. (2018). Mitutoyo America Corporation. <https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/15003A.pdf>.

Отримано 16.05.2025

UDC 621.0, 53.08

Yuriy Adamenko¹, Serhii Maidaniuk², Oleksandr Plivak², Serhii Lapkovsky⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: yuriy.adamenko@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206>. **Researcher ID:** ACT-0127-2022

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: maysv3@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>, **ResearcherID:** J-7542-2017

³Head of the Research (Experimental) Laboratory of Measuring Equipment of the Educational and Research Institute of Mechanical Engineering, Assistant Professor of the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: aplivak@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3680-8485>

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **Researcher ID:** HCH-3837-2022

VERIFICATION OF THE CALIPERS DISPLAY ACCURACY

In advanced machine building, when manufacturing parts, it is imperative to control their geometric accuracy. Many measurements are made using calipers. It is important to make sure that the measuring devices meet requirements on the established accuracy, as this affects the measurement accuracy and, consequently, the quality of the product. Therefore, in the context of machine-building enterprises, it is necessary, according to established procedures, to verify the accuracy of devices, in particular, to check the indication of calipers. However, in current regulatory literature, methods for checking the indication of calipers are given in general terms, and the operator has to solve some of issues related to the accuracy verification on his own. Thus, machine-building enterprises need to have clear and understandable procedures for assessing the accuracy of devices in operation.

The article presents the theoretical analysis of regulatory documents and experimental studies that allowed us to develop practical recommendations on the verification procedure of the accuracy of calipers' indication, in particular, the choice of control points, the number of repeated measurements, and the decision on whether the device meets or does not meet the specification. The developed recommendations will reduce the time for checking the accuracy of the caliper indication, which, in turn, will reduce the cost of verification calipers and improve the quality of inspection of parts.

Thus, it can be noted that the developed recommendations can reduce time and cost of the procedure for verification the accuracy of calipers' indication, which, in turn, will lead to the increase in the quality of control of machine parts in their manufacture, due to the absence of incorrectly defective and incorrectly valid parts.

Keywords: caliper; verification of accuracy; metrological characteristics; indication errors.

Fig.: 7. References: 10.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-32-40](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-32-40)

УДК 621.694.2:621.517.2:532.5

**Сергій Михайлович Ванєєв¹, Олег Юрійович Чех², Юрій Сергійович Мерзляков³,
Андрій Сергійович Карпцов⁴, Олександр Станіславович Мелейчук⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8205-0209>. SCOPUS Author ID: 56168752900²аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: o.cheh@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-481X>. SCOPUS Author ID: 57209244933³кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: y.merzlyakoff@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4516-5573>

SCOPUS Author ID: 56436708300

⁴аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: andrij.karptsov@student.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5481-2738>

ResearcherID: LSL-9719-2024

⁵аспірант кафедри технічної теплофізики

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2637-0106>. ResearcherID: NLO-4704-2025

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МАКСИМАЛЬНО ДОСЯЖНОГО ТИСКУ РІДИННО-ПАРОВОГО СТРУМИННОГО ЕЖЕКТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ДІАГРАМ

Запропоновано нову методику розрахунку рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ). Вона дає змогу точно визначати термодинамічні параметри та основні геометричні розміри РПСЕ у різних робочих режимах, використовуючи h,s -діаграми. Універсальність методу дозволяє застосовувати його до різних робочих речовин та широкого діапазону початкових параметрів. Практичне застосування методики полягає в покращенні проєктування РПСЕ для енергетичних установок, підвищуючи їхню ефективність та надійність. Наступним етапом можуть бути експериментальні дослідження для підтвердження теоретичних моделей.

Ключові слова: рідинно-паровий струминний апарат; двофазний ежектор; струменевий компресор; термодинамічний розрахунок; ентальпійно-ентропійна h,s -діаграма; енергетичні установки; проєктування; робоча речовина; енергетичне машинобудування; процеси фазових переходів.

Рис.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. У сучасній техніці широко використовуються процеси, що потребують вакууму, зокрема в таких галузях, як холодильна техніка, хімічна інженерія, енергетика та харчова промисловість. Одним з основних пристроїв для таких процесів є струминні апарати, зокрема ежектори, що застосовуються для різноманітних технологічних завдань. Зокрема, двофазні та однофазні ежектори є важливими елементами у холодильних та теплонасосних установках, у хімічній інженерії, а також у харчовій промисловості.

Перспективним напрямом є використання рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ), що працюють на основі струминної термокомпресії. Відмінною рисою цих апаратів є процес релаксаційного пароутворення в робочому соплі активного потоку, що може суттєво вплинути на ефективність технологічних процесів.

Дослідження в цій галузі є досить актуальними в контексті сучасних вимог до енергоефективності та екологічної безпеки. Пошук інноваційних рішень, які можуть підвищити ефективність і надійність технологічних процесів, є ключовим для забезпечення конкурентоспроможності підприємств у різних галузях промисловості, зокрема у сфері енергетичного машинобудування. Крім того, розробка рідинно-парових струминних апаратів відповідає глобальним екологічним викликам, затвердженим міжнародними угодами, такими як Кіотський протокол та Паризька угода, що сприяють зниженню викидів

парникових газів та підтримці сталого розвитку. Враховуючи сучасні тенденції в енергетиці та екології, розвиток цієї технології має потенціал для оптимізації використання ресурсів та, відповідно, зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Постановка проблеми. Однією з основних задач при проєктуванні вакуумних установок, що працюють на базі рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ), є розробка методики їхнього розрахунку, яка здатна точно відобразити складність процесів, що відбуваються у проточній частині апарату. Існують різні підходи до розрахунку двофазних струминних апаратів, однак усі вони базуються на спрощених методах, які використовують одновимірну модель процесу, що є наближенням, оскільки важливою характеристикою таких процесів є їхня неодномірність, зокрема при витіканні з каналів із непрофільованим входом, що проявляється у специфіці навколосвукових потоків. Попри велику кількість теоретичних та експериментальних досліджень, ці процеси потребують подальшого вивчення через складність змішування різнофазних струменів, обміну кількості руху, тепло- та масообмінні процеси, конденсацію, а також надзвукові режими течії та стрибки ущільнення. Через складну природу процесу передачі імпульсу у двофазних ежекторах процедура їх проєктування, заснована на точному теоретичному прогнозуванні продуктивності ежектора, все ще залишається відкритим питанням.

Проблема полягає в тому, що існуючі підходи до розрахунку струминних апаратів не завжди враховують усі фактори, які впливають на їхню ефективність, зокрема процеси релаксаційного пароутворення та взаємодію рідинно-парових фаз у робочому соплі. Відомі на сьогодні методики можуть застосовуватися, зазвичай, лише для обраного режиму роботи апарата у вузькому діапазоні його параметрів. Вичерпний огляд цих методик зробив у своїй монографії "Вакуумні агрегати на базі рідинно-парових ежекторів" (2024) доцент кафедри технічної теплофізики СумДУ Шарапов Сергій Олегович [1].

Для забезпечення коректності розрахунку процесів, що відбуваються в рідинно-парових струминних ежекторах (РПСЕ), необхідно розробити точну та універсальну методику, яка відповідатиме сучасним вимогам до їх проєктування. Оскільки ефективність РПСЕ значною мірою залежить від коректного моделювання термодинамічних та гідродинамічних процесів, важливо створити методику розрахунку, що дозволить більш точно прогнозувати робочі параметри цих апаратів.

Отже, детальне теоретичне та експериментальне дослідження робочого процесу РПСЕ, а також розробка теплофізичних методик для їх розрахунку, на сьогодні є актуальними та мають важливе практичне значення.

Мета статті полягає в розробці методики розрахунку рідинно-парових струминних ежекторів (РПСЕ) за допомогою комп'ютерних (електронних) термодинамічних h,s -діаграм, яка дозволяє точно визначати термодинамічні параметри в характерних точках циклу апарата, з використанням яких можна розрахувати основні геометричні розміри та експлуатаційні характеристики, а також проводити оцінку максимально досяжного тиску в апараті.

Кінцевий результат роботи полягає у створенні універсальної методики розрахунку, що забезпечить високу точність прогнозування параметрів роботи РПСЕ, що допоможе у проєктуванні таких апаратів. Користь від досягнення мети полягає у підвищенні ефективності та надійності технологічних процесів, у яких використовуються РПСЕ, завдяки більш точним розрахункам та оптимізації режимних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ряді досліджень розглядаються різноманітні аспекти проєктування, моделювання та оптимізації струминних апаратів, зокрема двофазних ежекторів, для різних промислових застосувань, включаючи системи охолодження, теплові насоси та вакуумні агрегати. Цей аналіз базується на численних роботах, що значно сприяли розвитку концепцій щодо підвищення ефективності струминних апаратів через вдосконалення їх конструкції, геометрії та чисельного моделювання.

Одним з основних напрямків є моделювання та оптимізація двофазних ежекторів для систем, що працюють з CO_2 . У роботі [2] представлена процедура моделювання двофазних ежекторів для різноманітних промислових застосувань, зокрема в охолодженні та теплових насосах. Моделі, розроблені в рамках цього дослідження, показали хорошу узгодженість з експериментальними даними, що підтверджує їх ефективність. Ці моделі дозволяють точно прогнозувати продуктивність та ефективність ежектора в реальних умовах, що є важливим для подальшої розробки таких систем.

У подальших дослідженнях [3] було здійснено детальний огляд поточного рівня техніки в моделюванні потоку в двофазних ежекторах для системи CO_2 (R744). Автори наголошують на важливості точного проектування двофазних ежекторів для досягнення високої енергоефективності в охолоджувальних системах, таких як HVAC&R ("Heating, Ventilation, Air Conditioning, and Refrigeration" (опалення, вентиляція, кондиціонування повітря та холодна техніка)). Вони підкреслюють необхідність застосування новітніх моделей для проектування, зокрема для визначення оптимальної геометрії та характеристик роботи ежекторів, що дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати в промислових застосуваннях.

Дослідження [4] моделює цикл транскритичного теплового насоса на CO_2 з двофазним ежектором для холодного клімату. Моделювання показує, що використання двофазного ежектора забезпечує значне покращення продуктивності теплового насоса завдяки оптимізації геометрії ежектора. Це дозволяє досягти вищої ефективності в умовах низьких температур, що робить таку систему ефективною для використання в регіонах з холодним кліматом.

Автори [5] зосереджують увагу на оптимізації конструкції двофазного ежектора за допомогою тривимірного чисельного моделювання. Автори досліджують вплив геометричних параметрів, таких як поперечний переріз і кут входу вторинного потоку, на ефективність роботи ежектора. Результати показали, що оптимізація допоміжних захоплювачів і їхнього розташування сприяє покращенню продуктивності ежектора, що підтверджує важливість точного проектування в цьому напрямку.

Авторами роботи [6] запропоновано розрахункову схему робочих процесів в рідинно-паровому струминному апараті вихрового типу. За розрахункову модель течії в струминному апараті прийнято модель течії з тангенціальною швидкістю. Також було отримано основні розрахункові рівняння процесу роботи в апараті вихрового типу з використанням моделі потоку з тангенціальною швидкістю. Отримані науково-практичні результати дозволяють визначити геометричні параметри та фізичні характеристики вихрового рідинно-парового струминного апарату.

Дослідження [7] пропонує простий підхід до конструкції двофазного ежектора для CO_2 , що працює в транскритичних умовах. Розроблена термодинамічна модель показала хорошу узгодженість з експериментальними даними та дозволила оптимізувати характеристики ежектора. Це дозволяє не тільки покращити ефективність роботи ежектора, але й досягти високої продуктивності за рахунок оптимального розміру й форми ежектора.

У дослідженні [8] представлено математичну модель комбінованої системи охолодження, що поєднує парокомпресійний цикл з ежекторним циклом охолодження. Модель дозволяє прогнозувати вплив геометрії ежектора та умов експлуатації на продуктивність системи охолодження. Результати дослідження показали, що геометрія ежектора суттєво впливає на ефективність роботи системи, зокрема на коефіцієнт корисної дії та продуктивність.

Щодо оптимізації конструкцій ежекторів, праця [9] пропонує нову концепцію регульованого сопла для ежектора. Застосування цієї технології дозволяє ефективно регулювати потік і покращити характеристики струминного апарату. Визначена емпірична формула для еквівалентної площі горловини дозволяє значно підвищити ККД струминного насоса, що є важливим аспектом для його ефективної роботи.

У роботі [10] проведено огляд останніх досягнень у розробці парокompресійних теплових насосів з ежекторами. Автори висвітлюють нові концепції одноступінчастих і двоступінчастих систем стиснення, що використовують один або кілька ежекторів. Огляд показує значний потенціал для покращення енергоефективності таких систем, проте автори зазначають обмежену кількість експериментальних даних для підтвердження теоретичних результатів, що потребує подальших досліджень.

Експериментальні дослідження струминних апаратів також займають важливе місце в наукових роботах. У роботі [11] описано експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. Дослідження показали, що форма камери змішування впливає на ефективність роботи апарата, а оптимальні геометрії можуть значно покращити результати роботи таких систем. У свою чергу, автори [12] провели числові розрахунки для проектування нафтових струминних насосів, використовуючи моделі турбулентності та агрегатні стани середовища. Результати показали, що врахування кавітації за допомогою моделі Релея-Плессета дозволяє підвищити ККД насоса втричі.

Нарешті, у статті [13] обговорюють останні досягнення в чисельному моделюванні струминних насосів для отримання вакууму, зокрема складні потоки, які включають ударні хвилі та фазові переходи. У ній наголошують на необхідності вдосконалення багатофазних моделей і методів моделювання турбулентності для точного прогнозування ефективності таких систем.

Загалом, проведений аналіз літератури показує, що застосування двофазних струминних апаратів, зокрема ежекторів, та їх оптимізація є важливими напрямками для підвищення ефективності різноманітних енергетичних систем. Прогрес у моделюванні, вдосконаленні конструкцій і проведенні експериментальних досліджень є важливими кроками до створення більш ефективних та енергоощадних технологій у сфері охолодження, опалення та вакуумних систем.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значні успіхи у вивченні РПСЕ, досі відсутня уніфікована методика розрахунку максимально досяжного тиску, яка б повною мірою враховувала складність взаємодії фаз та нестационарні режими роботи. Існуючі моделі часто базуються на спрощених припущеннях щодо термодинамічних процесів, що призводить до розбіжностей між теоретичними прогнозами та експериментальними даними, особливо для широкого діапазону робочих параметрів. Недостатньо дослідженими залишаються вплив варіативності геометрії камери змішування та конфузора на ефективність перетворення енергії та формування максимального тиску, що обмежує можливості оптимізації конструкції. Таким чином, розробка точної та універсальної методики розрахунку, що базується на детальному аналізі термодинамічних діаграм та враховує багатофакторний вплив експлуатаційних та конструктивних параметрів, залишається ключовою невирішеною задачею.

Виклад основного матеріалу. Нова методика розрахунку рідинно-парового струминного ежектора має наступні етапи:

1. Введемо перелік умовних позначень.

Початкові параметри для розрахунку наступні: C – швидкість потоку; f – площа перерізу, м^2 ; d – діаметр, м ; h – ентальпія, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; m – масова витрата, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; P – тиск, бар ; s – ентропія, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$; t – температура, $^{\circ}\text{C}$; v – питомий об'єм, $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; φ – коефіцієнт швидкості.

Індекси: 01 – вхідний переріз, b – переріз на виході з дифузора РПСЕ, a – переріз на виході із сопла активного потоку, f – переріз у горлі сопла активного потоку, s – ізоентропійний процес, d – процес у дифузори, c – процес у соплі.

2. Вибір вихідних даних для розрахунку.

Задаємося вихідними даними для розрахунку: P_{01} , бар та t_{01} , °C – тиск та температура потоку на вході в сопло активного потоку; P_a , бар – тиск потоку на виході з сопла. Приймаємо d_f , м – діаметр горла сопла, φ_c – коефіцієнт швидкості сопла.

Процес у соплі активного потоку.

3. Визначення ізоентропійних параметрів у соплі активного потоку (Ізоентропійний процес).

При P_{01} , бар та t_{01} , °C, визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку на вході в активне сопло: h_{01} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – ентальпія; s_{01} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ – ентропія; v_{01} , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ – питомий об'єм. За величиною тиску насиченої пари визначаємо тиск у горлі сопла $P_{s0} = P_f$, бар.

При $s = s_{fs} = \text{const}$ проводимо ізоентропу до перетину з ізобарою $P_{s0} = P_f$, та визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку у горлі сопла: t_{fs} , °C – температура; h_{fs} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – ентальпія; v_{fs} , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ – питомий об'єм.

Ізоентропійна швидкість у горлі сопла активного потоку визначається за формулою:

$$C_{fs} = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_{fs})}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

При $s = s_{01} = \text{const}$ проводимо ізоентропу до перетину з ізобарою P_a , бар, і визначаємо ізоентропні параметри потоку на виході з сопла: t_{as} , °C; h_{as} , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; v_{as} , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$.

Ізоентропійна швидкість на виході з сопла активного потоку:

$$C_{as} = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_{as})}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Далі визначаємо масову витрату та основні геометричні розміри (при d_f , м) за такими формулами.

Ізоентропійна масова витрата в соплі:

$$m_s = \frac{C_{fs} \cdot \pi \cdot d_f^2}{4 \cdot v_{fs}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Ізоентропійна площа горла сопла:

$$f_{fs} = \frac{m_s \cdot v_{fs}}{C_{fs}}, \text{м}^2.$$

Ізоентропійна площа вихідного перерізу сопла:

$$f_{as} = \frac{m_s \cdot v_{as}}{C_{as}}, \text{м}^2.$$

Ізоентропійний діаметр вихідного перерізу сопла:

$$d_{as} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{as}}{\pi}}, \text{м}.$$

4. Визначення дійсних параметрів у соплі активного потоку (Дійсний процес).

Визначаємо ККД сопла:

$$\eta_c = \varphi_c^2.$$

Дійсна ентальпія у горлі сопла визначається за формулою:

$$h_f = h_{01} - \varphi_c^2 \cdot (h_{01} - h_{fs}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

При P_f , бар та h_f , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, визначаємо, за діаграмою, дійсні параметри потоку в горлі сопла: t_f , °C; v_f , $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; s_f , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

Дійсна швидкість у горлі сопла активного потоку:

$$C_f = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_f)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Дійсна масова витрата в соплі:

$$m = \frac{c_f \cdot \pi \cdot d_f^2}{4 \cdot v_f}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Дійсна ентальпія на виході з сопла:

$$h_a = h_{01} - \varphi_c^2 \cdot (h_{01} - h_{as}), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

При P_a , бар та $h_a, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ визначаємо за діаграмою дійсні параметри потоку на виході із сопла: $t_a, ^\circ\text{C}$; $v_a, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_a, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Дійсна швидкість на виході із сопла активного потоку:

$$c_a = \sqrt{2 \cdot (h_{01} - h_a)}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Перевіряємо коефіцієнт швидкості сопла:

$$\varphi_c = \frac{c_a}{c_{as}}.$$

Тоді дійсна площа вихідного перерізу сопла:

$$f_a = \frac{m \cdot v_a}{c_a}, \text{м}^2.$$

Дійсний діаметр вихідного перерізу сопла:

$$d_a = \sqrt{\frac{4 \cdot f_a}{\pi}}, \text{м}.$$

Процес у камері змішування.

5. Визначення ізоентропійних параметрів у камері змішування (Ізоентропійний процес).

Розглянемо процес підвищення тиску в камері змішування без інжекції пасивного потоку (при нульовому коефіцієнті інжекції), тобто як процес перетворення кінетичної енергії на виході із сопла активного потоку в потенційну енергію тиску в дифузорі (процес підвищення тиску в дифузорі, як обернений процесу зниження тиску в активному соплі). У цьому випадку можна оцінити максимально досяжний тиск на виході з ежектора.

З точки «а», при $s = \text{const}$ проводимо ізоентропу до перетину з ізоентальпією $h_{4s} = h_{01}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, та визначаємо за діаграмою ізоентропні параметри потоку на виході з ежектора: P_{4s} , бар; $t_{4s}, ^\circ\text{C}$; $v_{4s}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_{4s}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Тиск P_{4s} є максимально досяжним тиском рідинно-парового струминного ежектора при ізоентропійному процесі підвищення тиску в дифузорі до початкової ентальпії h_{01} .

6. Визначення дійсних параметрів у камері змішування (Дійсний процес).

Задаємося ККД η_d або коефіцієнтом швидкості для дифузора: φ_d .

Ентальпія на виході з дифузора для дійсного процесу дорівнює початковій ентальпії h_{01} . Тоді для відповідного ізоентропійного процесу ентальпія на виході з дифузора дорівнює:

$$h_{bs} = h_a + \eta_d \cdot (h_{01} - h_a) = h_a + \varphi_d^2 \cdot (h_{01} - h_a), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

При $s = \text{const}$ проводимо ізоентропу до перетину з ізоентальпією $h_{0s} = h_{bs}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, та визначаємо, за діаграмою, ізоентропні параметри потоку на виході з дифузора ежектора:

P_{bs} , бар $t_{bs}, ^\circ\text{C}$; $v_{bs}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_{bs}, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Точка b (рис. 1) знаходиться на перетині ізобари $P_{bs} = P_b$ з ізентальпією $h_{01} = h_b$. Визначаємо за діаграмою параметри потоку на виході з дифузора ежектора в дійсному процесі « ab »: $t_b, ^\circ\text{C}$; $v_b, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$; $s_b, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$.

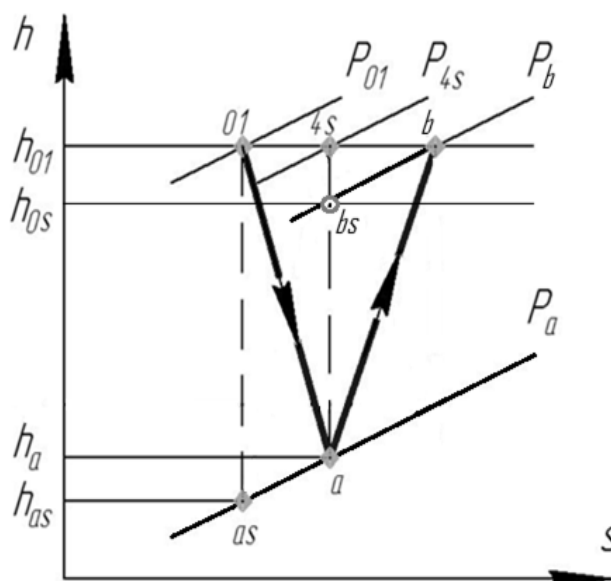


Рис. 1. Схема робочого процесу РПСЕ зображена у h,s -діаграмі

Джерело: розроблено авторами.

У цьому випадку тиск P_b є максимально досяжним тиском рідинно-парового струминного ежектора при дійсному процесі підвищення тиску в дифузорі для заданого ККД дифузора.

Висновки. У роботі запропоновано нову методику визначення максимально досяжного тиску рідинно-парового струминного ежектора (РПСЕ) з використанням комп'ютерних (електронних) термодинамічних h,s -діаграм, що дозволяє оцінити доцільність подальших розрахунків і проєктування апарату на задані параметри, а також визначати термодинамічні параметри в характерних точках циклу. Запропонована методика забезпечує достовірні результати розрахунків параметрів роботи РПСЕ та отримання їх основних геометричних розмірів при різних режимах роботи. Важливою перевагою запропонованого методу є його універсальність, що дозволяє застосовувати його до різних робочих речовин і адаптувати до широкого діапазону початкових параметрів.

Практичне застосування отриманих результатів полягає у можливості більш точного проєктування РПСЕ для енергетичних установок, щоб підвищити ефективність та надійність технологічних процесів у цих апаратах. Застосування розробленої методики дозволить значно покращити точність розрахунків і забезпечити оптимальне проєктування РПСЕ, що є перспективним напрямком розвитку в галузі енергетичного машинобудування. Наступним етапом дослідження є проведення експериментальних випробувань для кореляції теоретичних моделей із реальними результатами.

Список використаних джерел

1. Шарапов, С. О. (2024) *Вакуумні агрегати на базі рідинно-парових ежекторів*. Сумський державний університет.
2. Ameer, K., Aidoun, Z., & Ouzzane, M. (2016). Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors. *Applied Thermal Engineering*, (109), 809-818.
3. Ringstad, K., Allouche, Y., Gullo, P., Ervik, Å., Banasiak, K., & Hafner, A. (2020). A detailed review on CO₂ two-phase ejector flow modeling. *Thermal Science and Engineering*, (20), 100647.

4. Ameer, K., Aidoun, Z. (2021). Two-phase ejector enhanced carbon dioxide transcritical heat pump for cold climate. *Energy Conversion and Management*, (243), 114421.
5. Yan, J., Jiang, J., & Wang, Z. (2022). Optimization on Secondary Flow and Auxiliary Entrainment Inlets of an Ejector by Using Three-Dimensional Numerical Study. *Entropy*, (24).
6. Merzliakov, I., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Ivanov, V., & Agarwal, P. (2022). Flow Modeling in a Vortex Chamber of a Liquid–Steam Jet Apparatus. *Processes*, 10(5), 984.
7. Ameer, K., Aidoun, Z. (2023). A Simple Design Approach of Two-Phase Ejectors for CO₂ Transcritical Heat Pumps. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(10), 1833.
8. Ouelhazi, I., Ezzaalouni, Y., & Kairouani, L. (2020). Parametric analysis of a combined ejector-vapor compression refrigeration cycle. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 15, 398-408.
9. Guo, Y., Zhang, J., Ma, S., & Zhang, J. (2024). Coupling optimization design of adjustable nozzle for a steam ejector. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123550.
10. Gruber, S., Rola, K., Urbancl, D., & Goričanec, D. (2024). Recent Advances in Ejector-Enhanced Vapor Compression Heat Pump and Refrigeration Systems-A Review. *Energies*.
11. Шарапов, С. О., Євтушенко, С. О., & Хованський, С. О. (2024). Експериментальний стенд для дослідження процесів змішування в рідинно-парових струминних апаратах. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*, 24.2, 37-50.
12. Роговий, А. С., Костюк, М. О., & Азаров, А. С. (2022). Удосконалювання енергетичних параметрів нафтових струминних насосів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія "Гідравлічні машини та гідроагрегати"*, 1, 25-32.
13. Sadeghiseraji, J., Garcia-Vilchez, M., Castilla, R., & Raush, G. (2024). Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation-A Review. *Energies*.

References

1. Sharapov, S. O. (2024) Vakuumni ahrehaty na bazi ridynno-parovykh ezhektoriv [Vacuum units based on liquid-vapor ejectors]. *Sumskiy derzhavnyi universytet – Sumy State University*.
2. Ameer, K., Aidoun, Z., & Ouzzane, M. (2016). Modeling and numerical approach for the design and operation of two-phase ejectors. *Applied Thermal Engineering*, 109, 809-818.
3. Ringstad, K., Allouche, Y., Gullo, P., Ervik, Å., Banasiak, K., & Hafner, A. (2020). A detailed review on CO₂ two-phase ejector flow modeling. *Thermal Science and Engineering*, 20, 100647.
4. Ameer, K., Aidoun, Z. (2021). Two-phase ejector enhanced carbon dioxide transcritical heat pump for cold climate. *Energy Conversion and Management*, 243, 114421.
5. Yan, J., Jiang, J., & Wang, Z. (2022). Optimization on Secondary Flow and Auxiliary Entrainment Inlets of an Ejector by Using Three-Dimensional Numerical Study. *Entropy*, 24.
6. Merzliakov, I., Pavlenko, I., Ochowiak, M., Ivanov, V., & Agarwal, P. (2022). Flow Modeling in a Vortex Chamber of a Liquid–Steam Jet Apparatus. *Processes*, 10(5), 984.
7. Ameer, K., Aidoun, Z. (2023). A Simple Design Approach of Two-Phase Ejectors for CO₂ Transcritical Heat Pumps. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(10), 1833.
8. Ouelhazi, I., Ezzaalouni, Y., & Kairouani, L. (2020). Parametric analysis of a combined ejector-vapor compression refrigeration cycle. *International Journal of Low-carbon Technologies*, 15, 398-408.
9. Guo, Y., Zhang, J., Ma, S., & Zhang, J. (2024). Coupling optimization design of adjustable nozzle for a steam ejector. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123550.
10. Gruber, S., Rola, K., Urbancl, D., & Goričanec, D. (2024). Recent Advances in Ejector-Enhanced Vapor Compression Heat Pump and Refrigeration Systems—A Review. *Energies*.
11. Sharapov, S. O., Yevtushenko, S. O., & Khovanskyi, S. O. (2024). Eksperymentalnyi stend dlia doslidzhennia protsesiv zmishuvannia v ridynno-parovykh strumynnykh aparatakh [Experimental stand for studying mixing processes in liquid-vapor jet devices]. *Zaporizhzhia: Pratsi Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnologichnogo universytetu imeni Dmytra Motornoho - Proceedings of the Tavria State Agrotechnological University named after Dmitry Motorny*, 24.2, 37-50.
12. Rohovyi, A. S., Kostyuk, M. O., & Azarov, A. S. (2022). Udoskonaliuvannia enerhetychnykh parametriv naftovykh strumynnykh nasosiv [Improving the energy parameters of oil jet pumps]. *Kharkiv: Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "KhPI". Seriya "Hidravlichni mashyny ta hidroahrehaty" – Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series "Hydraulic Machines and Hydraulic Units"*, 1, 25-32.

13. Sadeghiseraji, J., Garcia-Vilchez, M., Castilla, R., & Raush, G. (2024). Recent Advances in Numerical Simulation of Ejector Pumps for Vacuum Generation—A Review. *Energies*.

Отримано 10.06.2025

UDC 621.694.2:621.517.2:532.5

Serhii Vanieiev¹, Oleh Chekh², Iurii Merzliakov³, Andrii Karptsov⁴, Oleksandr Meleichuk⁵

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: s.vaneev@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8205-0209>. SCOPUS Author ID: 56168752900

²PhD Student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: o.chekh@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-481X>. SCOPUS Author ID: 57209244933

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: y.merzlyakoff@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4516-5573>
SCOPUS Author ID: 56436708300

⁴postgraduate student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: andrii.karptsov@student.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5481-2738>
ResearcherID: LSL-9719-2024

⁵PhD Student of the Department of Technical Thermophysics
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: ol.meleychuk@kttf.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2637-0106>. ResearcherID: NLO-4704-2025

METHOD OF CALCULATING THE MAXIMUM ACHIEVABLE PRESSURE OF A LIQUID-VAPOR JET EJECTOR USING THERMODYNAMIC DIAGRAM

The current landscape of energy production and industrial processes increasingly demands highly efficient and reliable equipment. Liquid-vapor jet ejectors (LVJEs), due to their simplicity, absence of moving parts, and ability to handle various working fluids, offer a compelling solution for a range of applications, including vacuum generation, refrigeration, and thermal compression. However, accurate design and optimization of these devices remain challenging due to complex thermodynamic interactions involved. Existing calculation methods often rely on simplified assumptions or empirical correlations, which may limit their applicability and accuracy across different operating conditions and working fluids.

This work introduces a novel methodology for calculating LVJEs, enabling precise determination of thermodynamic parameters at key points of their operating cycle through the application of enthalpy-entropy (h,s) diagrams. The proposed methodology yields reliable results for calculating LVJE operational parameters and deriving their fundamental geometric dimensions across various operating conditions. A significant advantage of this method is its inherent universality, allowing for its application with diverse working fluids and adaptability to a broad spectrum of input parameters.

The practical utility of these findings lies in the potential for more accurate design of LVJEs for energy installations, thereby enhancing the efficiency and reliability of technological processes within these devices. Implementation of the developed methodology is expected to significantly improve calculation accuracy and facilitate optimal LVJE design, representing a promising avenue for advancement in the field of power engineering. The subsequent phase of this research involves conducting experimental validations to correlate theoretical models with real-world outcomes. This will provide empirical support for the proposed methodology and refine its predictive capabilities.

Keywords: liquid-vapor jet apparatus; two-phase ejector; jet compressor; thermodynamic calculation; enthalpy-entropy h,s -diagram; energy installations; projecting; working substance; power machinery; phase transition processes.

Fig.: 1. References: 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-41-48](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-41-48)

УДК 539.4+620.1

Анатолій Павлович Грабовський¹, Олександр Анатолійович Бондарець²¹кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: grabovskiy@gmail.com, **ORCID** <https://orcid.org/0009-0002-0334-5381>, **Scopus Author ID:** [55249720600](https://orcid.org/0009-0002-0334-5381)²кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: bondarets.o@gmail.com, **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-2897-0116>, **Scopus Author ID:** [57195440534](https://orcid.org/0000-0003-2897-0116)

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ З АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі принципів та підходів до аналізу кінетики накопичення пошкоджень при експлуатації конструкцій з анізотропних матеріалів у роботі представлено методику оцінювання деградації фізико-механічних властивостей анізотропного матеріалу під дією пружно-пластичного навантаження, що враховує зміну об'єму і форми одиничного розміру об'єму виділеного елемента матеріалу - репрезентативного елемента (РЕ).

Ключові слова: анізотропія ефективних напружень; репрезентативний елемент; розсіяні пошкодження; зміна об'єму; зміна форми.

Рис.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У сучасному машинобудуванні, авіації, суднобудуванні, космічній та енергетичній галузях дедалі частіше використовують анізотропні матеріали, що мають високу питому міцність та жорсткість, проте їхня експлуатаційна надійність значною мірою зумовлена складними механізмами анізотропії пошкоджуваності, що значно відрізняються від аналогічних процесів в ізотропних матеріалах. Деградація фізико-механічних властивостей при накопиченні розсіяних пошкоджень в анізотропному матеріалі конструкції характеризує ресурс часу її експлуатації до руйнування. На сьогодні немає усталених універсальних методик для оцінки пошкоджуваності анізотропних конструкцій – тому потрібні нові підходи, моделі та критерії, розробка яких має велике як наукове, так і практичне значення.

Постановка проблеми. При проектуванні та експлуатації виробів та конструкцій із полімерних анізотропних матеріалів постає задача визначення ресурсу роботи, яка на пряму залежить від деградації фізико-механічних характеристик матеріалу з часом експлуатації інженерних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням функціонального аналізу деградації фізико-механічних властивостей при експлуатації конструкцій присвячено надзвичайно широке коло наукових праць [1-5]. Зокрема в монографії М. Бобири [1] узагальнені тензор-феноменологічні моделі та критерії пошкоджуваності композиційних анізотропних матеріалів для умов малоциклового та динамічного навантаження. У роботах [2-4] проведено аналіз феноменологічних моделей кінетики пошкодження та доведено суттєвий вплив анізотропії на характеристики пошкоджуваності, у роботі [5] представлено узагальнену модель накопичення мікропошкоджень з врахуванням анізотропії, що дозволяє будувати кінетичні криві та зменшити кількість базових експериментів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вивчення деградації фізико-механічних властивостей анізотропних матеріалів при пружно-пластичному навантаженні інженерних об'єктів мало вивчене. Тому для вивчення ресурсу їх експлуатації питання розрахунку пошкоджуваності анізотропних матеріалів, на сьогодні, актуальні.

Метою статті є розробка методики розрахунку кінетики накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах, яка враховує зміну об'єму і форми в матеріалі при пружно-пластичному навантаженні інженерних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації інженерних об'єктів з анізотропних матеріалів, які перебувають під дією експлуатаційного пружно-пластичного навантаження, у матеріалі відбуваються структурні зміни, що створюють ріст та накопичення мікропошкоджень різної форми і природи, відбувається фізична та хімічна флуктуація в матеріалі, викликана розривами міжатомних та міжмолекулярних зв'язків, що призводить до зародження і розвитку макроскопічних тріщин, які згодом накопичуються до утворення магістральної тріщини й у кінцевому результаті до руйнування.

Поява різного роду мікропошкоджень у матеріалі призводить до зміни об'єму $\Delta V_i = V_i - V_0$ і форми $\Delta \theta_i = \theta_i - \theta_0$ РЕ матеріалу згідно з початковими положеннями координатних осей (рис. 1) [6].

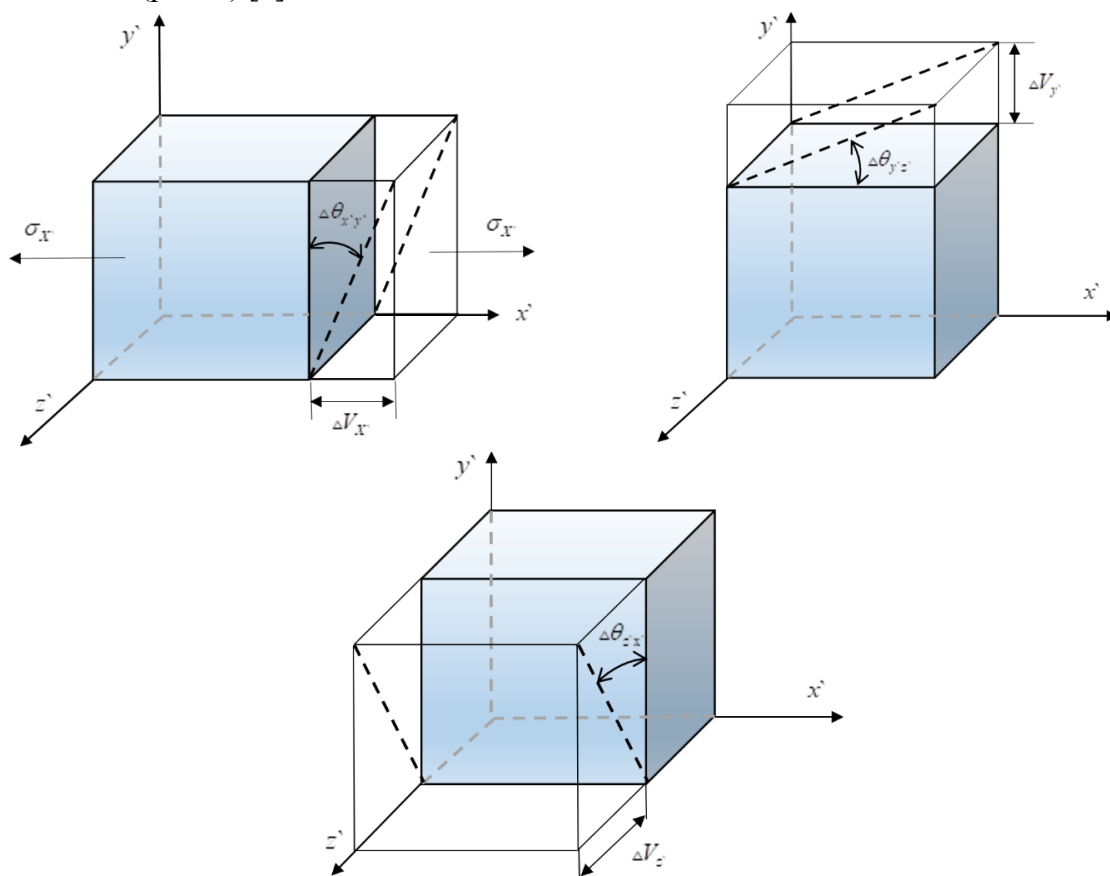


Рис. 1. Характер зміни об'єму і форм РЕ при появі мікропошкоджень для координатних осей [6]

Відносна величина пошкоджень анізотропного матеріалу, що характеризує зміну об'єму $-D_\sigma$ визначається відношенням:

$$D_\sigma = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_V} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_V}; \rightarrow \varepsilon_V = \frac{D_{\sigma_i}}{1 - D_{\sigma_i}} = F(D_\sigma), \quad (1)$$

Відносна величина пошкоджень анізотропного матеріалу, що характеризує зміну форми виражається відношенням:

$$D_\tau = \frac{\theta_i - \theta_0}{\theta_i} = 1 - \frac{\theta_0}{\theta_0 + \Delta \theta_V} = 1 - \frac{1}{1 + \gamma_V}; \rightarrow \gamma_V = \frac{D_{\tau_i}}{1 - D_{\tau_i}} = F(D_\tau), \quad (2)$$

де $\varepsilon_V = \Delta V_V / V_0$ - відносна зміна об'єму РЕ за напрямками координатних осей

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'} + \varepsilon_{z'}, \quad (3)$$

$\theta_V = \Delta\theta_V / \theta_0$ - відносна зміна форми РЕ між площадками РЕ відповідно:

$$\gamma_V = \gamma_{x'y'} + \gamma_{y'z'} + \gamma_{z'x'}, \quad (4)$$

функція зміни об'єму при пошкодженні $0 \leq F(D_\sigma) \rightarrow \infty$, відношення ушкодженого об'єму РЕ $-D_\sigma$ до незруйнованого об'єму $(1-D_\sigma)$:

$$F(D_\sigma) = \frac{D_{\sigma_i}}{1-D_{\sigma_i}} \quad (5)$$

функція зміни форми при пошкодженні $0 \leq F(D_\tau) \rightarrow \infty$, відношення ушкодженого об'єму РЕ $-D_\tau$ до незруйнованої зміни форми $(1-D_\tau)$ анізотропного матеріалу:

$$F(D_\tau) = \frac{D_{\tau_i}}{1-D_{\tau_i}} \quad (6)$$

При загальному пружно-пластичному навантаженні матеріалу на гранях РЕ виникають ефективні нормальні $-\tilde{\sigma}$ та дотичні $-\tilde{\tau}$ напруження [2-3]

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_0}{1-D_\sigma}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau_0}{1-D_\tau}, \quad (7)$$

де σ_0 та τ_0 - нормальні та дотичні напруження в РЕ до межі пружності матеріалу, D_σ та D_τ - кінетика накопичення пошкоджень у результаті зміни об'єму ε_V та форми γ_V .

З відношення (2) випливає:

$$\tilde{\sigma} - \sigma_0 = \tilde{\sigma} \cdot D_\sigma, \quad \tilde{\tau} - \tau_0 = \tilde{\tau} \cdot D_\tau; \quad (8)$$

використовуючи (1) та (3) загальна функція зміни об'єму для РЕ дорівнює:

$$F(D_\sigma) = F_{D_{\sigma_x}} + F_{D_{\sigma_y}} + F_{D_{\sigma_z}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{D_{\sigma_x}}{1-D_{\sigma_x}} + \frac{D_{\sigma_y}}{1-D_{\sigma_y}} + \frac{D_{\sigma_z}}{1-D_{\sigma_z}}, \quad (9)$$

використовуючи відношення (2) та (4) загальна функція зміни форми для РЕ дорівнює:

$$F(D_\tau) = F_{D_{\tau_{xy}}} + F_{D_{\tau_{yz}}} + F_{D_{\tau_{zx}}} = \gamma_{xy} + \gamma_{yz} + \gamma_{zx} = \frac{D_{\tau_{xy}}}{1-D_{\tau_{xy}}} + \frac{D_{\tau_{yz}}}{1-D_{\tau_{yz}}} + \frac{D_{\tau_{zx}}}{1-D_{\tau_{zx}}}. \quad (10)$$

Використовуючи закон Гука, тензорна форма функції пошкоджуваності, яка враховує функції зміни форми й об'єму виражається залежністю:

$$F_{(D)} = \frac{D_{lm}}{1-D_{lm}} = C_{iklm}(\tilde{\sigma} - \sigma_0)_{ik}, \quad (11)$$

де індекси i, k, l, m - послідовно приймають значення 1, 2, 3,

$D_{lm} / (1-D_{lm})$ - відносна величина пошкоджуваності;

$(\tilde{\sigma} - \sigma_0)_{ik}$ - зміна напруження;

C_{iklm} - пружні постійні, які характеризують матеріал і визначаються експериментально.

Відповідні позначення напружень систематизовано в табл. 1.

При повороті осей координат компоненти тензора четвертого рангу змінюються згідно із законом (множниками тут є добутки чотирьох косинусів кутів між новими і старими напрямками координатних осей).

$$F_{(D')} = \frac{D_{l'm'}}{1-D_{l'm'}} = C_{i'k'l'm'} = C_{iklm} C_{i'i} C_{k'k} C_{l'l} C_{m'm}. \quad (12)$$

Таблиця 1 – Схематизація позначень компонент тензора напружень

Система позначення	Компоненти тензора напружень		
Буквенне позначення	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_x$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xy}$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xz}$
	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{yx}$	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_y$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{yz}$
	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xz}$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{zy}$	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_z$
Числове позначення	σ_{11}	σ_{12}	σ_{13}
	σ_{21}	σ_{22}	σ_{23}
	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}

Формула (12) дозволяє обчислити величину пружних постійних для довільно орієнтованих в матеріалі напрямів (нових осей координат x', y', z'), якщо відомі їхні величини для певних головних напрямів (старих осей координат x, y, z). Формула (12) записана у скороченій формі, яка характеризує складання за всіма індексами, які двічі зустрічаються в правій частині. Усі індекси послідовно набувають значення 1,2,3. Буквами C позначені косинуси кутів між старою і новою системами координат.

Для обчислення всіх функцій пошкоджуваності анізотропного матеріалу в загальному випадку потребується 81 значення пружних постійних, які створюють тензор четвертого рангу. З умов рівноваги випливає, що попарна перестановка індексів не змінить компоненти тензора пружних постійних:

$$C_{iklm} = C_{kilm} = C_{ikml} = C_{kiml} \quad (13)$$

Таким чином, чисельність різних компонент тензора четвертого рангу зменшиться до 36 у загальному випадку анізотропного тіла й у випадку незбігу осей координат із головними осями анізотропії ортотропного тіла. У табл. 2 наведено 36 компонент тензора четвертого рангу.

Таблиця 2 – Компоненти тензора четвертого рангу

Друга пара індексів	Перша пара індексів					
	11	22	33	12	23	31
11	C_{1111}	C_{2211}	C_{3311}	$2C_{1211}$	$2C_{2311}$	$2C_{3111}$
22	C_{1122}	C_{2222}	C_{3322}	$2C_{1222}$	$2C_{2322}$	$2C_{3122}$
33	C_{1133}	C_{2233}	C_{3333}	$2C_{1233}$	$2C_{2333}$	$2C_{3133}$
12	$2C_{1112}$	$2C_{2212}$	$2C_{3312}$	$4C_{1212}$	$4C_{2312}$	$4C_{3112}$
23	$2C_{1123}$	$2C_{2223}$	$2C_{3323}$	$4C_{1223}$	$4C_{2323}$	$4C_{3123}$
31	$2C_{1131}$	$2C_{2231}$	$2C_{3331}$	$4C_{1231}$	$4C_{2331}$	$4C_{3131}$

У табл. 3 наведено функції зміни об'єму $\frac{D_{\sigma_{x'}}}{1-D_{\sigma_{x'}}}; \frac{D_{\sigma_{y'}}}{1-D_{\sigma_{y'}}}; \frac{D_{\sigma_{z'}}}{1-D_{\sigma_{z'}}$ в напрямку дії нормальних напружень $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}$, а також відповідні функції зміни форми $\frac{D_{\tau_{x'y'}}}{1-D_{\tau_{x'y'}}}; \frac{D_{\tau_{y'z'}}}{1-D_{\tau_{y'z'}}}; \frac{D_{\tau_{z'x'}}}{1-D_{\tau_{z'x'}}$ в напрямку дії дотичних напружень $\tau_{x'y'}, \tau_{y'z'}, \tau_{z'x'}$.

Таблиця 3 – Технічні пружні постійні анізотропного тіла

Індекси функції деформацій	Індекси напружень					
	11	22	33	12	23	31
11	$\frac{1}{E_{x'}}$	$-\frac{\mu_{y'x'}}{E_{y'}}$	$-\frac{\mu_{z'x'}}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',x'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',x'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',x'}}{G_{z'x'}}$
22	$-\frac{\mu_{x'y'}}{E_{x'}}$	$\frac{1}{E_{y'}}$	$-\frac{\mu_{z'y'}}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',y'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',y'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',y'}}{G_{z'x'}}$
33	$-\frac{\mu_{x'z'}}{E_{x'}}$	$-\frac{\mu_{y'z'}}{E_{y'}}$	$\frac{1}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',z'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',z'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',z'}}{G_{z'x'}}$
12	$\frac{\nu_{x',x'y'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',x'y'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',x'y'}}{E_{z'}}$	$\frac{1}{G_{x'y'}}$	$\frac{\eta_{y'z',x'y'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\eta_{z'x',x'y'}}{G_{z'x'}}$
23	$\frac{\nu_{x',y'z'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',y'z'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',y'z'}}{E_{z'}}$	$\frac{\eta_{x'y',y'z'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{1}{G_{y'z'}}$	$\frac{\eta_{z'x',y'z'}}{G_{z'x'}}$
31	$\frac{\nu_{x',z'x'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',z'x'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',z'x'}}{E_{z'}}$	$\frac{\eta_{x'y',z'x'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\eta_{y'z',z'x'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{1}{G_{z'x'}}$

де E, G, μ, ν, η – модулі пружності, зсуву, коефіцієнти поперечної деформації та взаємного впливу. Індекси у E, G, μ мають значення відповідних величин для кожного напрямку в матеріалі. Перший індекс при μ означає напрям дії напруження, а другий напрям дії деформації. Подвійні індекси у G відповідають напрямам, між якими проходить зміна прямого кута. Для коефіцієнтів ν та η індекси, які стоять до коми, означають напрям дії напруження, яке викликає деформацію, а індекси, що стоять після коми – напрям деформації, наприклад: $\nu_{x',x'y'}$ - коефіцієнт, що визначає величину лінійної деформації в напрямку x' при дії одних тільки дотичних напружень $\tau_{x'y'}$. Своєю чергою коефіцієнти $\eta_{x'y',y'z'}$ визначають кути зсуву $\gamma_{y'z'}$ при дії дотичних напружень $\tau_{x'y'}$. Для компонент представлених в таблиці 3 виконуються 15 співвідношень, що випливають з умови (12), що справедливі для будь-якого анізотропного матеріалу для якого справедливе допущення про існування пружного потенціалу:

$$\begin{aligned}
 &\text{три співвідношення вигляду } \frac{\mu_{ki}}{E_k} = \frac{\mu_{ik}}{E_i} \\
 &\text{дев'ять відношення вигляду } \frac{\gamma_{i,kl}}{E_i} = \frac{\gamma_{kl,i}}{G_{kl}} \\
 &\text{три співвідношення вигляду } \frac{\eta_{ik,lm}}{G_{ik}} = \frac{\eta_{lm,ik}}{G_{lm}}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Для ортотропного матеріалу в головних осях анізотропії x, y, z згідно з обов'язковими трьома співвідношеннями.

$$\frac{\mu_{xy}}{E_x} = \frac{\mu_{yx}}{E_y}; \frac{\mu_{xz}}{E_x} = \frac{\mu_{zx}}{E_z}; \frac{\mu_{yz}}{E_y} = \frac{\mu_{zy}}{E_z}; \tag{15}$$

з урахуванням яких число незалежних постійних дорівнює 9.

Таблиця 4 – Технічні пружні постійні в осях симетрії ортотропного матеріалу

Індекси функції пошкоджень	Індекси напружень					
	11	22	33	12	23	31
11	$\frac{1}{E_x}$	$-\frac{\mu_{yx}}{E_y}$	$-\frac{\mu_{zx}}{E_z}$	0	0	0
22	$-\frac{\mu_{xy}}{E_x}$	$\frac{1}{E_y}$	$-\frac{\mu_{zy}}{E_z}$	0	0	0
33	$-\frac{\mu_{xz}}{E_x}$	$-\frac{\mu_{yz}}{E_y}$	$\frac{1}{E_z}$	0	0	0
12	0	0	0	$\frac{1}{G_{xy}}$	0	0
23	0	0	0	0	$\frac{1}{G_{yz}}$	0
31	0	0	0	0	0	$\frac{1}{G_{zx}}$

У табл. 4 в головних осях анізотропії ортотропного матеріалу маємо:

$$\left. \begin{aligned}
 C_{1111} &= \frac{1}{E_x}; 4C_{1212} = \frac{1}{G_{xy}} \\
 C_{2222} &= \frac{1}{E_y}; 4C_{2323} = \frac{1}{G_{yz}} \\
 C_{3333} &= \frac{1}{E_z}; 4C_{3131} = \frac{1}{G_{zx}} \\
 C_{1122} &= -\frac{\mu_{xz}}{E_x} = -\frac{\mu_{yx}}{E_y} \\
 C_{2233} &= -\frac{\mu_{yz}}{E_y} = -\frac{\mu_{zy}}{E_z} \\
 C_{3311} &= -\frac{\mu_{zx}}{E_z} = -\frac{\mu_{xz}}{E_x}
 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Висновки. У роботі отримані відношення, які характеризують функції кінетики накопичення пошкоджень за зміною об'єму і форми репрезентативного одиничного об'єму (РЕ) при експлуатації інженерних об'єктів із анізотропних матеріалів. Встановлені межі зміни функцій об'єму і форми від початку навантаження до руйнування. Отримано узагальнений тензор функції пошкоджуваності анізотропного матеріалу, який враховує зміну об'єму і форми в результаті накопичення пошкоджень при експлуатації інженерних об'єктів. У роботі отримано тензор четвертого рангу для обчислення кінетики накопичення пошкоджень у загальному вигляді орієнтації координатних осей, що не збігаються з головними напрямками орієнтації та тензор кінетики накопичення пошкоджень для ортотропного матеріалу в головних осях анізотропії.

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

Під час написання цього матеріалу автори НЕ використовували генеративний ШІ та технологій на основі ШІ.

Список використаних джерел

1. Бобир, М. І., Коваль, В. В., & Фам, Д. К. (2023). *Пошкоджуваність та граничний стан елементів конструкцій при складному навантаженні* (Монографія). КПІ ім. Ігоря Сікорського.
2. Грабовський, А., Бондарець, О., & Бабієнко, І. (2023). Пошкоджуваність матеріалів при пропорційному навантаженні. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2 (98)), 223–227. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955>.
3. Грабовський, А., Бондарець, О., & Бабієнко, І. (2021). Кінетика пошкоджуваності матеріалів при різних режимах повторно-змінних навантажень. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 325–331. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026>.
4. Lemaitre, J., Desmorat, R., & Sauzay, M. (2000). Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 19(2), 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
5. Bobyr, M. I., & Bondarets, O. A. (2023). Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 55, 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>.
6. Hrabovskyi, A., & Bondarets, O. (2025). Damage kinetics of anisotropic materials in construction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 114, 94–100. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.94-100>.

References

1. Bobyr, M. I., Koval, V. V., & Pham, D. K. (2023). *Poshkodzhuvanist ta hranichnyi stan elementiv konstruksii pry skladnomu navantazheni [Damage accumulation and limit state of structural elements under complex loading]*. KPI imeni Ihoria Sikorskoho – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
2. Grabovskyi, A., Bondarets, O., & Babiyenko, I. (2023). Poshkodzhuvanist materialiv pry proporsiinomu navantazheni. [Damageability of materials under proportional loading.] *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2 (98)), 223–227. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955>.
3. Grabovskyi, A., Bondarets, O., & Babiyenko, I. (2021). Kinetyka poshkodzhuvanosti materialiv pry riznykh rezhymakh povtorno-zminnykh navantazhen. [Damage kinetics of materials under different modes of repeated variable loading]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 325–331. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026>.
4. Lemaitre, J., Desmorat, R., & Sauzay, M. (2000). Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 19(2), 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
5. Bobyr, M. I., & Bondarets, O. A. (2023). Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 55, 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>.
6. Hrabovskyi, A., & Bondarets, O. (2025). Damage kinetics of anisotropic materials in construction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 114, 94–100. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.94-100>.

Отримано 19.06.2025

UDC 539.4+620.1

Anatolii Hrabovskyi¹, Oleksandr Bondarets²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines and Strenght of Materials National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: grabovskiy@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0002-0334-5381>. Scopus Author ID: 55249720600

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines and Strenght of Materials National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bondarets.o@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2897-0116>. Scopus Author ID: 5195440534

DAMAGE EVOLUTION DURING THE SERVICE LIFE OF STRUCTURES MADE OF ANISOTROPIC MATERIALS

In modern mechanical engineering, aviation, shipbuilding, aerospace, and energy industries, anisotropic materials with high specific strength and stiffness are increasingly used. However, their operational reliability is largely determined by complex anisotropic damage mechanisms that differ significantly from analogous processes in isotropic materials. When designing and operating

products and structures made from polymer anisotropic materials, it is essential to determine the service life, which directly depends on the degradation of the material's physico-mechanical properties over time during the operation of engineering objects.

The analysis of recent studies and publications shows that the degradation of mechanical properties of anisotropic materials under elastoplastic loading of engineering structures is insufficiently studied and is the subject of an extensive body of scientific work. The purpose of this article is to develop a methodology for calculating the kinetics of damage accumulation in anisotropic materials, taking into account changes in volume and shape of the material under elastoplastic loading of engineering structures.

The work derives relationships characterizing the kinetics functions of damage accumulation based on changes in volume and shape of a representative elementary volume (REV) during the operation of engineering objects made of anisotropic materials. The limits of variation in volume and shape functions from the start of loading to failure are established. A generalized damage tensor function for anisotropic materials is obtained, which accounts for changes in volume and shape as a result of damage accumulation during the operation of engineering objects.

Keywords: anisotropy of effective stresses; representative element; scattered damage; volume change; shape change.

Рис.: 1. Бібл.: 6.

Павло Васильович Кондрашев¹¹кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: kondrashev@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>, ResearcherID: AAK-5011-2020**МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОРОШКОВОЇ КОМПОЗИЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ DMLS**

Стрімкий розвиток науково-технічного прогресу та інноваційних технологій спонукає швидко реагувати наукову спільноту на запити від промисловців та інженерів з усього світу. У будь-якій галузі промисловості широко використовуються 3D-технології, зокрема один із прогресивних методів візуалізації віртуальних комп'ютерних моделей DMLS (пряме лазерне сплавлення порошкової композиції). Тому безумовно залишається актуальним пошук шляхів вдосконалення цієї технології. Метою цієї роботи є підвищення ефективності реалізації технології DMLS шляхом вдосконалення засобу доставки порошкової композиції в зону дії лазерного випромінювання, а саме впровадження додаткового джерела енергії у вигляді електромагнітного поля. У цій роботі було проведено моделювання поведінки газопорошкового струменя під впливом електромагнітного поля. Зокрема досліджено його поперечне розподілення в горизонтальній площині, а також було виявлено фокусну відстань (локальну область із найбільшою концентрацією порошку) на виході з коаксіального сопла. Також була розроблена універсальна методика керування розподілом дисперсної фази газопорошкового струменя в зоні лазерної обробки за допомогою керованого електромагнітного поля, що дозволяє підвищити ККД використання порошкової композиції, спростити конструкцію коаксіального сопла, а також дозволяє знизити собівартість виготовлення засобу доставки порошку в зону лазерної обробки.

Ключові слова: електромагнітне поле; коаксіальне сопло; лазерне випромінювання; порошкова композиція.

Рис.: 8. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Сучасна кон'юнктура ринку інноваційних технологій спонукає до пошуку нових рішень та підходів, спрямованих на підвищення ефективності реалізації будь-якої технології, у будь-якій галузі промисловості. Особливо зараз, коли постійно розширюється потреба у використанні нових матеріалів з унікальними фізико-механічними характеристиками, які важко оброблюються традиційними технологіями, стрімко розвиваються альтернативні нетрадиційні методи та підходи обробки матеріалів, які більш відомі як адитивні технології. Одним із поширених технологічних процесів, серед них є метод прямого лазерного сплавлення порошкової композиції, більш відомий як DMLS. Показники ефективності цього методу в порівнянні з іншими унікальними, але водночас залишається актуальною низка задач, спрямованих для пошуку різноманітних рішень та методів для вдосконалення цієї технології.

Постановка проблеми. Як було зазначено вище, одну з провідних ролей у низці адитивних технологій відіграє саме технологія прямого лазерного спікання порошкового матеріалу, а саме DMLS [1-3]. Ефективність практичної реалізації даної технології напряму залежить від конструктивних особливостей засобу доставки порошкової композиції у зону дії лазерного променя. Попри значну кількість існуючих інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності реалізації цієї технології, саме шляхом модифікації засобу доставки порошкового матеріалу в зону обробки, залишається великий потенціал для подальшого пошуку шляхів вдосконалення цього технологічного вузла. Слід зазначити той факт, що основні зусилля наукової спільноти спрямовані саме на підвищення ефективності використання порошкової композиції за рахунок зниження масової витрати, при цьому не зменшуючи якісні показники сплавлених виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На підставі аналізу апіорної інформації, слід відзначити наступне, а саме багато наукових досліджень спрямовані саме на зміну та вдосконалення конструкції засобу доставки порошкової композиції в зону лазерної обробки [4; 5], але цей шлях не завжди є раціональним з погляду економічної доцільності. Це пояснюється передусім з ускладненням конструкції коаксіальних сопел, які в деяких випадках мають досить складну геометричну конфігурацію. Для їх виготовлення необхідно залучення

коштовного обладнання і як результат – собівартість таких вузлів значно зростає. Окрему увагу слід приділити гібридним способам підвищення ефективності реалізації технології DMLS. Коли для керування поперечним розподілом порошкової композиції використовують додаткові джерела енергії, а саме статичне магнітне поле [6; 7]. Для цього по периметру засобу доставки порошкової композиції розташовують постійні магніти, які здатні створювати магнітне поле, яке впливає саме на формування фокальної площини газопорошкового струменя, тобто збільшення його поперечної концентрації. Цікавими саме в контексті технології DMLS є також роботи [8-10], де реалізована схема застосування електромагнітного поля для керування формою та розподілом дисперсної фази газопорошкового струменя в зоні дії лазерного променя. Підсумовуючи аналіз літературної інформації, слід відзначити, що гібридні технології в наш час набувають широкого застосування в технологічних процесах та значно розширюють потенціал для пошуку нових методів та підходів, спрямованих на підвищення ефективності реалізації технології DMLS.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На підставі аналізу літературних джерел, присвячених цій науковій темі, можна виділити такі недосліджені напрямки, а саме: у вищезазначених роботах провідних науковців не було враховано зменшення масової витрати порошкового матеріалу, що своєю чергою дає можливість підвищити ККД використання матеріалу при реалізації технології DMLS. У цій роботі було запропоновано універсальний підхід для використання додаткового джерела енергії у вигляді електромагнітного поля. А також розроблена оптимальна схема розташування магніту щодо засобу доставки порошкової композиції в зону лазерної обробки.

Метою статті є підвищення ефективності реалізації технології DMLS, за рахунок використання додаткового джерела енергії у вигляді керованого електромагнітного поля з оптимальним розташуванням усіх його компонентів щодо засобу доставки порошкової композиції в зону лазерної обробки.

Методика проведення досліджень. Практична реалізація технології DMLS являє собою складний динамічний процес, ефективність якого залежить від багатьох факторів. Причому одну з вирішальних ролей відіграє ККД витрати порошкового матеріалу. Враховуючи аналіз апріорної інформації, було застосовано універсальний підхід, спрямований на підвищення ефективності реалізації технології DMLS, який включає в себе пошук оптимальних граничних умов для подальшого використання їх у чисельному аналізі гідродинамічних процесів поведінки газопорошкового струменя в коаксіальному соплі та на виході з нього. Для моделювання газодинамічних процесів поведінки газопорошкового струменя, було обрано програмний комплекс Ansys CFX, який добре зарекомендував себе для вирішення такого роду задач і включає в себе весь необхідний інструментарій.

Для моделювання руху дисперсної фази в потоці газу (теоретична складова програмного комплексу) CFX, з урахуванням розміру фракції порошкової композиції ПГСП-3 (60 мкм), було використано метод Ейлера, який враховує різницю концентрацій дисперсної фази між двома точками, які визначає дифузійний потік, створений турбулентними пульсаціями суцільного середовища. Для розрахунку турбулентності двох фаз була застосована стандартна ($k-\varepsilon$) модель Лаундера-Соплдинга, яка застосовується для моделювання газопорошкових струменів із невеликими градієнтами турбулентних пульсацій. Модель розподілення дисперсної фази будується з урахуванням того, що кожний вихор має нестабільну складову швидкості V_f , період існування τ_e та довжину L_e . Отже, турбулентна швидкість, довжина та період існування кожного вихору розраховуються на підставі заданих граничних умов турбулентного потоку та визначаються таким рівнянням (1):

$$V_f' = \Gamma \sqrt{\frac{2k}{3}}, L_e = \frac{C_\mu^{\frac{3}{4}} k^3}{\varepsilon}, \tau_e = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{2k}{3}}} \quad (1)$$

де k – скалярний коефіцієнт енергії турбулентного потоку;

ε – скалярний коефіцієнт розсіювання потоку;

C_μ – постійна турбулентності;

$C_\mu^{\frac{3}{4}}$ – фактор обраний для утворення зв'язку між шкалою довжини та довжиною вихорю.

З погляду практичної складової чисельне моделювання процесу поведінки газопорошкового струменя на відміну від робіт [4; 5] проводилося для базової конфігурації коаксіального сопла з геометрією твірних внутрішнього та зовнішнього сопел 40° . Граничні умови, які необхідні для побудови сітки кінцевих елементів 3D-моделі форми газопорошкового струменя задавалися з урахуванням керування величиною електромагнітного поля, що власне стало реперними точками для початкових параметрів геометрії газопорошкових потоків CAD-системи. Тобто експериментальним шляхом було визначено оптимальний діапазон кутів (30° - 70°) твірних внутрішнього та зовнішнього сопел з урахуванням величини електромагнітного поля (рис. 1).

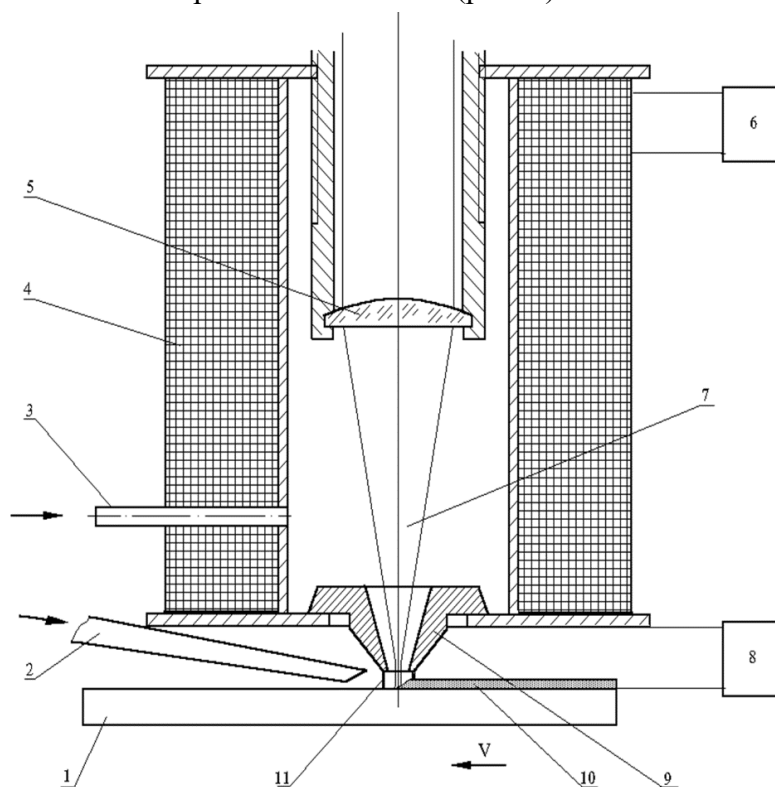


Рис. 1. Схема експериментального устаткування для визначення оптимального діапазону кутів твірних внутрішнього та зовнішнього сопел з урахуванням величини електромагнітного поля:

- 1 – деталь; 2 – сопло для подачі порошку; 3 – канал для подачі захисного газу;
 4 – електромагніт; 5 – фокусуючий об'єктив; 6 – джерело живлення електромагніта;
 7 – сфокусований лазерний промінь; 8 – джерело живлення дозатора порошкової композиції; 9 – сопло для подачі газу; 10 – сплавлений шар порошку;
 11 – електромагнітне поле на виході з сопла

Після отримання початкових геометричних параметрів за допомогою CAD-системи, були побудовані 3D-моделі газопорошкових струменів (рис. 2).

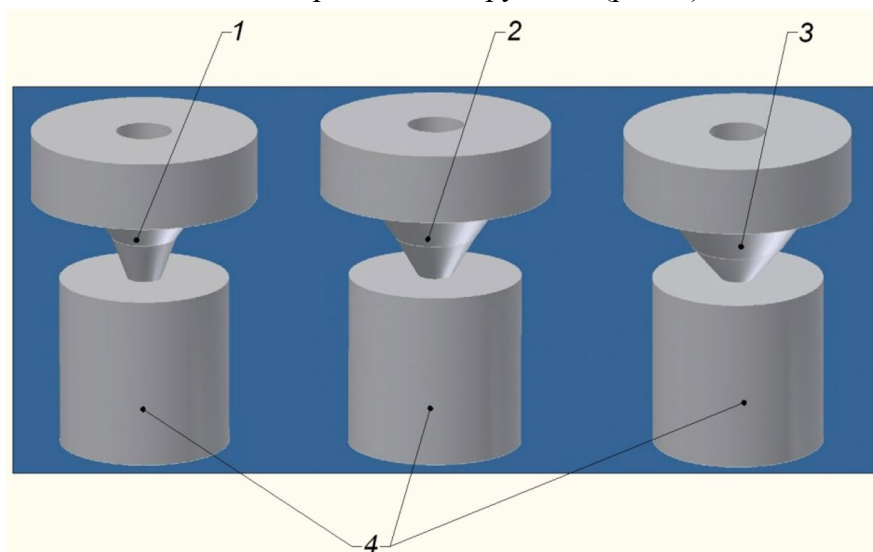


Рис. 2. Геометрії внутрішнього середовища системи фокусування порошку:
1, 2, 3 – кути твірних коаксіальних сопел для різних величин електромагнітного поля;
4 – потенційне середовище розподілення дисперсної фази газопорошкового струменя після виходу з коаксіального сопла

Наступним кроком, з урахуванням побудованих в CAD-системі 3-D геометрій газопорошкових струменів, були згенеровані сітки кінцевих елементів потенційних середовищ поведінки дисперсної фази газопорошкового струменя для внутрішньої частини та на виході з коаксіального сопла (рис. 3).

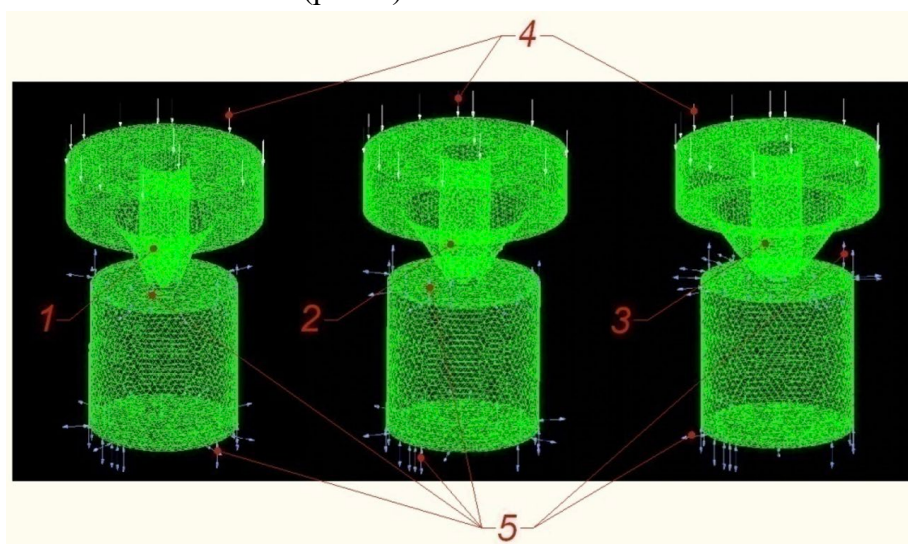


Рис. 3. Сітки кінцевих елементів 3D-геометрій газопорошкових струменів для різних величин електромагнітного поля:
1-4 – потенційне середовище розподілення дисперсної фази у внутрішній частині коаксіального сопла; 5 – потенційне середовище розподілення дисперсної фази після виходу з коаксіального сопла

Після проведених розрахунків програмним комплексом Ansys CFX, було отримано моделі розподілення поперечної концентрації дисперсної фази газопорошкового струменя для різних величин електромагнітного поля у вертикальній та горизонтальній площинах (рис. 4, 5).

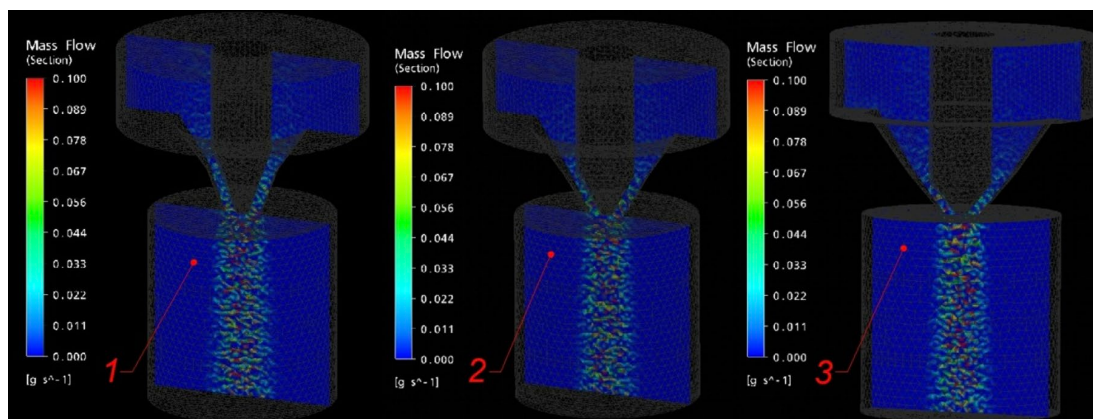


Рис. 4. Розподілення дисперсної фази газопорошкового струменя у вертикальній площині для різних величин електромагнітного поля

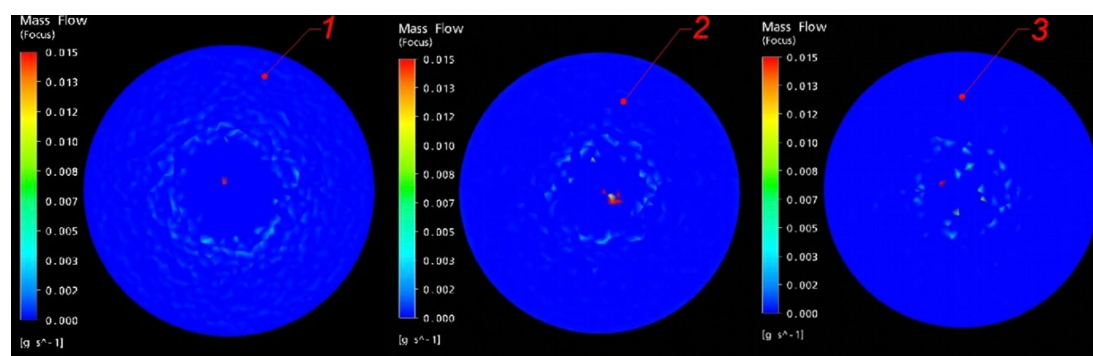


Рис. 5. Розподілення дисперсної фази газопорошкового струменя в горизонтальній площині для різних величин електромагнітного поля

Результати проведених досліджень. Результати проведеного чисельного моделювання показали ефективність цього підходу для пошуку оптимальних параметрів керування розподілом поперечної концентрації дисперсної фази газопорошкового струменя (рис. 4, 5). Ефективність застосування гібридних методів для керування формою газопорошкового струменя, зокрема застосування електромагнітного впливу на порошковий матеріал підтверджена проведеними розрахунками. Зокрема, виявлена фокальна область газопорошкового струменя в вертикальній площині (рис. 4, б) 0,1 г/с та горизонтальній площині (рис. 5, б) 0,015 г/с, при величині електромагнітного поля 0,12 Тл.

Для графічної інтерпретації результатів чисельного моделювання розподілу дисперсної фази газопорошкового струменя в зоні дії лазерного випромінювання, були побудовані графічні залежності масової витрати порошкової композиції від величини електромагнітного поля у вертикальній та горизонтальній площинах (рис. 6). Як видно з графічних залежностей (рис. 6, 1-2), максимальна концентрація дисперсної фази газопорошкового струменя у вертикальній площині спостерігається при величині електромагнітного поля 0,12 Тл, що відповідає максимальній витраті порошкового матеріалу 0,1 г/с. Що стосується горизонтальної площини, тут максимальна концентрація дисперсної фази спостерігається при величині електромагнітного поля також 0,12 Тл, але значення масової витрати порошкової композиції становить 0,015 г/с, що є значно меншим, це пояснюється відсутністю глибини фокуса газопорошкового струменя в горизонтальній площині.

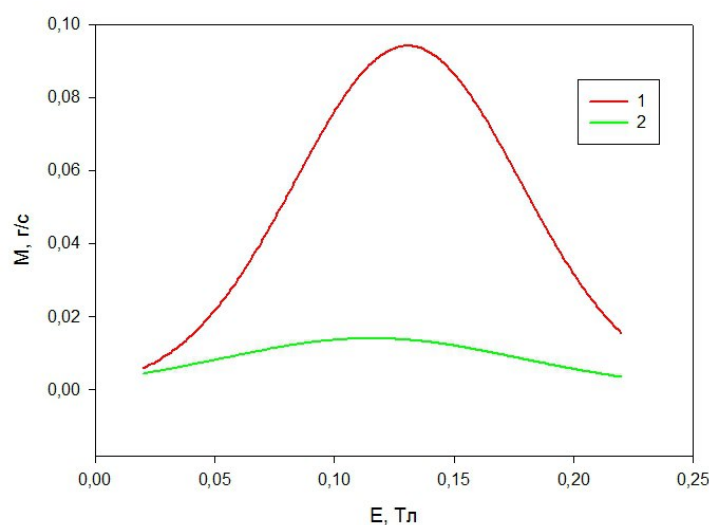


Рис. 6. Залежність масової витрати порошкової композиції (M) від величини електромагнітного поля (E):

1 – вертикальна площина; 2 – горизонтальна площина

Фактично максимальна концентрація дисперсної фази газопорошкового струменя в горизонтальній площині є фокусом потоку порошку. Для перевірки адекватності розрахунків чисельного моделювання поведінки газопорошкового струменя під впливом електромагнітного поля, було проведено експериментальне вимірювання положення фокуса потоку порошку (рис. 7).

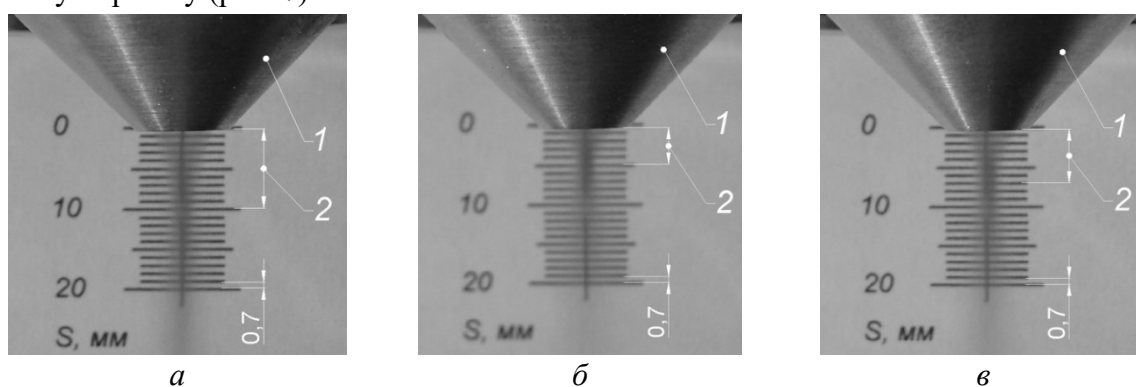


Рис. 7. Загальний вигляд газопорошкового струменя для різних величин електромагнітного поля:

а – значення електромагнітного поля 0,05 Тл;

б – значення електромагнітного поля 0,12 Тл;

в – значення електромагнітного поля 0,20 Тл

Для вимірювання фокальної відстані газопорошкового струменя на виході з коаксіального сопла, на задньому фоні було використано білий екран з нанесеною за допомогою САД-системи шкалою в масштабі 1 поділка еквівалентна 0,7 мм. Опираючись на результати експериментальних досліджень, була встановлена можливість керування формою газопорошкового струменя за рахунок впливу керованого електромагнітного поля, а також підтверджена адекватність чисельного моделювання розподілу дисперсної фази газопорошкового струменя. Причому слід відзначити, що при значенні електромагнітного поля 0,12 Тл, була досягнута максимальна концентрація дисперсної фази газопорошкового струменя в горизонтальній площині (0,15 г/с) (рис. 7, б) відстань від сопла дорівнює 3,5 мм. Це

пояснюється оптимальними показниками величини електромагнітного поля, які здатні зужувати потік порошку не залежно від кутів твірних коаксіального сопла. Водночас для менших значень електромагнітного поля спостерігається зворотний процес, тобто розширення газопорошкового струменя в горизонтальній площині і збільшення фокальної відстані до 7 мм (рис. 7, а). Це пояснюється зменшенням впливу електромагнітного поля на порошкову композицію і відповідно розподіл дисперсної фази в горизонтальній площині формується більшою мірою за рахунок величини кутів твірних коаксіального сопла. Аналогічна ситуація спостерігається і при збільшенні значення електромагнітного поля, тобто відбувається збільшення фокальної області газопорошкового струменя, фокальна відстань складає 4,9 мм (рис. 7, в). Це пояснюється головним чином тим, що занадто велике значення електромагнітного поля змушує рухатися частинки дисперсної фази в перехресному напрямку, що своєю чергою призводить до збільшення фокальної області газопорошкового струменя, тобто можна спостерігати граничний рівень величини електромагнітного поля, після якого відбувається реверсивні регенеративні процеси відновлення форми газопорошкового струменя, тобто збільшення його фокальної області. Графічна інтерпретація залежності масової витрати порошкової композиції від фокальної області та величини електромагнітного поля наведена на рис. 8.

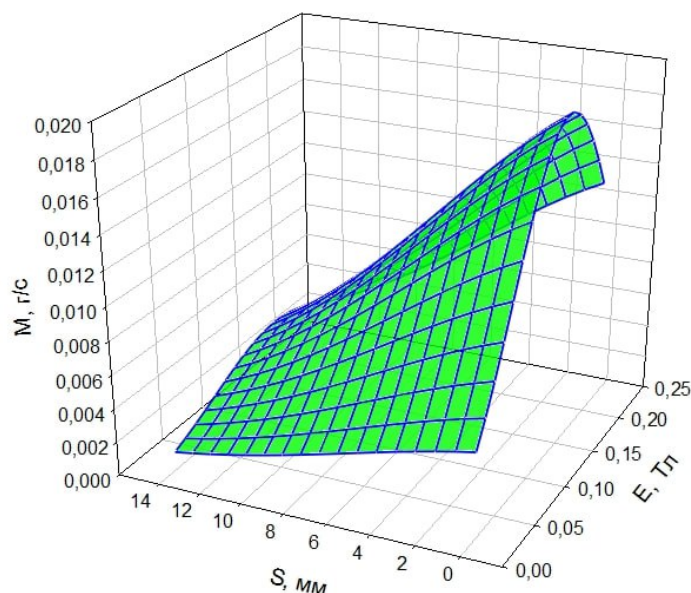


Рис. 8. Залежність масової витрати порошкової композиції (M) та фокальної відстані газопорошкового струменя (S) від величини електромагнітного поля (E)

Опираючись на вище наведений аналіз можна стверджувати, що даний підхід є універсальним і масштабованим, його можна застосовувати для будь-якого виду дрібнодисперсної, до 100 мкм фракції порошкової композиції, незалежно від хімічного складу, а також ця методика дозволяє уникнути та значно спростити конструкцію засобу доставки порошку в зону лазерної обробки і як наслідок, знизити собівартість виготовлення коаксіальних сопел при реалізації технології DMLS.

Висновки. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

- розроблена універсальна методика керування розподілом дисперсної фази газопорошкового струменя в зоні лазерної обробки за допомогою керованого електромагнітного поля, що дозволяє підвищити ККД використання порошкової композиції, спростити конструкцію коаксіального сопла, а також дозволяє знизити собівартість виготовлення засобу доставки порошку в зону лазерної обробки;

- встановлено оптимальні параметри керування формою та фокальною відстанню газопорошкового струменя (зокрема величина електромагнітного поля 0,12 Тл), при якій спостерігається максимальна концентрація дисперсної фази в фокальній області величиною 0,015 г/с;

- доведена можливість керування зміною відстані фокальної області газопорошкового струменя в потрібному напрямку на виході з коаксіального сопла, що дає можливість адаптації та оптимізації, а також потенційного суміщення фокальних областей лазерного випромінювання та газопорошкового струменя.

Список використаних джерел

1. Martins, I. M., Esperto, L., & Santos, M. J. G. (2006). Sintering M3/2 high speed steel powder by DMLS process. *Materials science forum*, 514-516, 1506–1510. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.514-516.1506>.
2. Śliwa, R. E., Bernaczek, J., & Budzik, G. (2016). The application of direct metal laser sintering (DMLS) of titanium alloy powder in fabricating components of aircraft structures. *Key Engineering Materials*, 687, 199–205. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.687.199>.
3. Dvorak, K., Zarybnicka, L., & Dvorakova, J. (2019). Quality parameters of 3D print products by the DMLS method. *Manufacturing Technology*, 19(2), 209–215. <https://doi.org/10.21062/ujep/271.2019/a/1213-2489/mt/19/2/209>.
4. Gabor, T., Yun, H., Akin, S., Kim, K.-H., Park, J.-K., & Jun, M. B.-G. (2022). Continuous coaxial nozzle designs for improved powder focusing in direct laser metal deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.039>.
5. Liu, Q., Li, W., Yang, K., Gao, Y., Wang, L., & Chu, X. (2023b). Analytical investigation into the powder distribution and laser beam-powder flow interaction in laser direct energy deposition with a continuous coaxial nozzle. *Advanced Powder Technology*, 34(7), 104058. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.104058>.
6. Кондрашев, П. (2023). Вплив магнітного поля на якість внутрішньої мікроструктури при лазерному сплавленні порошку. *Технічні науки та технології*, (1(31)), 29–35. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-29-35](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-29-35).
7. Kolesnyk, I. (2021). Sintering of powder ferromagnetic materials by visible radiation in a constant magnetic field. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 10(2), 1166–1168. <https://doi.org/10.21275/sr21210142444>.
8. Wróbel, T. (2013). Transformation of pure Al structure under the influence of electromagnetic field. *Advanced Materials Research*, 702, 159–164. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.702.159>.
9. Panourgias, K., & Ekaterinaris, J. A. (2013). Numerical solution of ionized gas compressible flows under the influence of electromagnetic fields. *Y 21st AIAA computational fluid dynamics conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2449>.
10. Sun, H., Hua, Z., Jiang, H., Dong, D., Li, G., & Cui, J. (2024). Densification behavior in compaction for Cu/TiB₂ composite under electromagnetic impact. *Advanced Powder Technology*, 35(11), 104653. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2024.104653>.

References

1. Martins, I. M., Esperto, L., & Santos, M. J. G. (2006). Sintering M3/2 high speed steel powder by DMLS process. *Materials science forum*, 514-516, 1506–1510. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.514-516.1506>.
2. Śliwa, R. E., Bernaczek, J., & Budzik, G. (2016). The application of direct metal laser sintering (DMLS) of titanium alloy powder in fabricating components of aircraft structures. *Key Engineering Materials*, 687, 199–205. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.687.199>.
3. Dvorak, K., Zarybnicka, L., & Dvorakova, J. (2019). Quality parameters of 3D print products by the DMLS method. *Manufacturing Technology*, 19(2), 209–215. <https://doi.org/10.21062/ujep/271.2019/a/1213-2489/mt/19/2/209>.
4. Gabor, T., Yun, H., Akin, S., Kim, K.-H., Park, J.-K., & Jun, M. B.-G. (2022). Continuous coaxial nozzle designs for improved powder focusing in direct laser metal deposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 83, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.08.039>.

5. Liu, Q., Li, W., Yang, K., Gao, Y., Wang, L., & Chu, X. (2023b). Analytical investigation into the powder distribution and laser beam-powder flow interaction in laser direct energy deposition with a continuous coaxial nozzle. *Advanced Powder Technology*, 34(7), 104058. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2023.104058>.
6. Kondrashov, P. (2023). Vplyv mahnitnoho polia na yakist vnutrishnoi mikrostruktury pry lazernomu splavlenni poroshku. [Effect of magnetic field on the quality of internal microstructure during laser powder fusion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, (1(31)), 29–35. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1\(31\)-29-35](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-1(31)-29-35).
7. Kolesnyk, I. (2021). Sintering of powder ferromagnetic materials by visible radiation in a constant magnetic field. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 10(2), 1166–1168. <https://doi.org/10.21275/sr21210142444>.
8. Wróbel, T. (2013). Transformation of pure Al structure under the influence of electromagnetic field. *Advanced Materials Research*, 702, 159–164. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.702.159>.
9. Panourgias, K., & Ekaterinaris, J. A. (2013). Numerical solution of ionized gas compressible flows under the influence of electromagnetic fields. In *21st AIAA computational fluid dynamics conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2449>.
10. Sun, H., Hua, Z., Jiang, H., Dong, D., Li, G., & Cui, J. (2024). Densification behavior in compaction for Cu/TiB₂ composite under electromagnetic impact. *Advanced Powder Technology*, 35(11), 104653. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104653>.

Отримано 16.04.2025

UDC 621.9.048

Pavlo Kondrashev¹

¹PhD, Assistant Professor of the department Laser System and Advanced Technologies

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: kondrashev@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7428-710X>. ResearcherID: [AAK-5011-2020](https://orcid.org/AAK-5011-2020)

MODELING OF DISTRIBUTION OF THE POWDER COMPOSITION UNDER THE INFLUENCE OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD WHEN IMPLEMENTING DMLS TECHNOLOGY

Rapid development of scientific and technological progress and innovative technologies prompts the scientific community to respond quickly to requests from industrialists and engineers from all over the world. In any industry, 3-D technology is widely used, in particular, one of the progressive methods of visualizing virtual computer models is DMLS (direct laser fusion of powder composition). Therefore, the search for ways to improve this technology certainly remains relevant.

The analysis of priori information allowed us to obtain comprehensive information on the state of scientific research aimed at finding ways to improve efficiency of the DMLS technology implementation. In particular, it was found that the main emphasis of research is on the use of hybrid methods and approaches aimed at finding additional energy sources, including electromagnetic fields for combined use with laser technology.

The aim of this work is to improve efficiency of implementing DMLS technology by improving the means of delivering the powder composition into the laser radiation zone, namely, by introducing additional energy source in the form of the electromagnetic field.

In this work, numerical modeling of the behavior of a gas-powder jet under the influence of the electromagnetic field was carried out. In particular, distribution of the dispersed phase of the gas-powder jet was investigated, namely its transverse concentration in the horizontal plane. Numerical modeling of the behavior of the gas-powder jet made it possible to determine the local region of the powder flow and also establish possibility of controlling the main technological parameters of the process, in particular, the optimal value of the electromagnetic field at which the maximum concentration of the dispersed phase in the gas-powder jet is observed was determined. The universal technique was also developed that makes it possible to simplify geometric configuration and reduce the cost of manufacturing means of delivering powder material to the laser processing zone.

Key words: electromagnetic field; coaxial nozzle; laser fusion; powder composition.

Fig.: 8. References: 10.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-58-67](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-58-67)

УДК 621.91

**Андрій Сергійович Манохін¹, Сергій Анатолійович Клименко²,
Сергій Анатолійович Клименко³**

¹кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: the.manokhin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

ResearcherID: [DGN-4506-2022](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482). SCOPUS Author ID: [37059129600](https://orcid.org/0000-0003-1479-8482)

²доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: atmu@meta.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>

ResearcherID: [Q-8928-2019](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771). SCOPUS Author ID: [57221904325](https://orcid.org/0000-0003-1464-3771)

³кандидат технічних наук, старший дослідник,

старший науковий співробітник відділу «Технологічного управління якістю обробки інструментами із НТМ»

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (Київ, Україна)

E-mail: alcon1202@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

ResearcherID: [FFQ-3675-2022](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519). SCOPUS Author ID: [57197629303](https://orcid.org/0000-0002-7913-5519)

ПАРАМЕТРИ ПЕРЕРІЗУ ЗРІЗУ ПІД ЧАС ФІНІШНОГО ТОЧІННЯ РІЗЦЯМИ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ЗА КОСОКУТНОЮ СХЕМОЮ РІЗАННЯ

Наведено результати досліджень форми та розмірів перерізів зрізу, що мають місце у процесі фінішного точіння різцями з прямолинійною, увігнутою та випуклою різальними кромками, які працюють за косокутною схемою різання. З врахуванням того, що переріз зрізу обмежений різальною кромкою та лініями перетину основної площини інструменту з поверхнею, обробленою на попередньому оберті виробу (однопорожнинний гіперболоїд обертання) та ще необробленою поверхнею (циліндр) виробу, запропонований алгоритм розрахунку показників перерізу зрізу. Показано, що співвідношення довжини активної частини різальної кромки різця до середньої товщини зрізу знижується при збільшенні кута нахилу різальної кромки, однак для інструментів з прямолинійною та увігнутою різальними кромками така зміна має значно інтенсивніший характер при $\lambda < 20^\circ$, а для різця з випуклою різальною кромкою – при $\lambda > 20^\circ$. Найбільшу шорсткість на обробленій поверхні формує різець з випуклою різальною кромкою, а за рахунок зміни прямолинійної різальної кромки на увігнуту можливо значно зменшити висоту мікронерівностей на обробленій поверхні.

Ключеві слова: косокутна схема різання; переріз зрізу; прямолинійна; увігнута; випукла різальна кромка; довжина активної частини різальної кромки; товщина стружки; шорсткість обробленої поверхні.

Рис.: 5. Бібл.: 16.

Актуальність теми досліджень. Тенденції розвитку процесів механічної обробки, як будь-якої технічної системи, пов'язані зі спрямованим забезпеченням отримання максимального результату з мінімальними витратами. Стосовно фінішних технологій обробки це пов'язано з високою продуктивністю з'єму матеріалу припуску і формуванням у поверхневому шарі виробу такого стану, який би найліпшим чином забезпечував працездатність виробу в експлуатації [1–3]. Відповідність процесів обробки відміченої тенденції забезпечується, зокрема, шляхом збільшення зони взаємодії інструмента з виробом, що може бути досягнуто за рахунок підвищення площі контакту інструмента з виробом, а також заміни точкового контакту інструмента з виробом на розподілений за його поверхнею.

Створення різальних інструментів, використання яких дозволяє забезпечити потрібні показники якості поверхні та стану поверхневого шару оброблених виробів при високій продуктивності процесу обробки, є важливою складовою для розвитку сучасного виробництва.

Постановка проблеми. До числа інструментів, які працюють зі збільшеною ділянкою контакту з оброблюваним виробом, належать різці, що працюють за косокутною схемою різання. При цьому це можуть бути інструменти з однією прямолинійною різальною кромкою («бриючі» інструменти), а також інструменти, які працюють виключно в межах радіусної частини при вершині, або інструменти, які мають також головну та допоміжну різальні кромки. Звичайно, до останніх можна віднести більшість існуючих різальних інструментів, але вплив кута нахилу різальної кромки λ на продуктивність обробки та якість обробленого виробу суттєво проявляється за його значних величин.

Закономірності різання косокутним інструментом суттєво пов'язані з параметрами перерізу зрізу залежно від величини кута нахилу різальної кромки λ , визначення яких до цього часу не виконано повною мірою, що потребує подальшого дослідження для випадків використання інструментів різного виконання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес обробки з косокутною схемою різання розглядався в багатьох публікаціях [4; 5] при виготовленні виробів інструментами з різних матеріалів, у тому числі загартованих сталей різцями, оснащеними компонентами на основі кубічного нітриду бору, наприклад [6].

Аналіз технічної літератури показує наявність декількох підходів та алгоритмів розрахунку параметрів перерізу зрізу для випадку обробки інструментом з однією різальною кромкою. Зокрема, у роботах [7–9] запропоновано геометричні моделі та аналітичні залежності, що враховують просторове положення різальної кромки та її нахил до осі обертання деталі. У роботі [7] розглянуто метод визначення перерізу зрізу з урахуванням геометрії інструменту при косокутному заточенні, в [8] – запропоновано уточнений розрахунок товщини та форми стружки для косокутного точіння, який базується на аналітичному описі взаємного положення різальної кромки та заготовки. У роботі [9] проведено експериментальні дослідження та моделювання текстури поверхні, яка формується в результаті обробки при різних значеннях кута нахилу різальної кромки. При цьому слід мати на увазі, що збіжність розрахункових результатів із експериментальними значеннями залежить від діапазону кута нахилу різальної кромки: точність моделей знижується зі збільшенням цього кута, що обумовлює потребу у подальшому вдосконаленні відповідних розрахункових алгоритмів для забезпечення адекватного опису процесу різання в широкому діапазоні умов.

У [4] також розглянуто варіант використання інструменту з увігнутою різальною кромкою, що охоплює оброблюваний виріб на її ділянці величиною не менш ніж $S/(2\cos\lambda)$, де S – величина поздовжньої подачі; λ – кут нахилу різальної кромки інструменту, а радіус увігнутої різальної кромки визначається як

$$R_k = \frac{R}{\sin^2 \lambda \cdot \cos^2 \gamma \cdot \cos \alpha},$$

де R – радіусу поверхні виробу, що обробляється; α , γ – задній та передній кути інструменту відповідно.

Використання такого інструменту забезпечує значне зменшення шорсткості обробленої поверхні за рахунок охоплення оброблюваної поверхні різальною кромкою інструменту.

Випадок обробки із використанням інструменту з випуклою різальною кромкою, що працює за косокутною схемою, розглянуто в [10]. У цій роботі розглянуто модельний випадок обробки торцевим фрезеруванням, тому не враховано геометричні параметри оброблюваного виробу. Автори в [11; 12] використали той самий підхід для визначення перерізу зрізу для процесу точіння. У роботі [13] було розроблено 3D-модель різального інструменту із радіусною різальною кромкою для розрахунку площі стружки та довжини різальної кромки, використовуючи В-сплайнову інтерполяцію кривої різальної кромки, при цьому в роботі не враховувався кут повороту різальної кромки для косокутної схеми обробки. У роботі [14] була створена аналітична модель для круглих різальних пластин, яка враховувала кут повороту різальної кромки при косокутній схемі обробки, проте всі розрахунки були проведені для пластини, яка оберталась навколо своєї осі. У роботах [15; 16] представлені моделі та аналітичні рішення визначення довжини активної різальної кромки, перерізу стружки із врахуванням кута нахилу різальної кромки при косокутному різанні, переднього, заднього кутів інструменту та радіусу різальної кромки, розрахунки приведені для змінних круглих різальних пластин, проте в роботах не наведено порівняння розрахунків для інших форм різальної кромки.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. У наявній технічній літературі немає порівняльних даних щодо показників перерізу зрізу при використанні інструментів з прямолінійною, увігнутою та випуклою різальними кромками, що працюють за косокутною схемою.

Метою статті є визначення та порівняння параметрів перерізу зрізу у процесі косокутного різання різцями з прямолінійною, увігнутою та випуклою різальними кромками, а також впливу параметрів зрізу на шорсткість обробленої поверхні та умови проведення процесу різання.

Методика досліджень. Радіус оброблюваного валу $R = 40, 50, 100, 150$ та 200 мм. Подача $0,2; 0,5; 0,67$ та $2,5$ мм/об, глибина різання $0,1$ та $0,2$ мм.

Кут нахилу різальної кромки для досліджуваних інструментів $\lambda = 0$ та $(40-60)^\circ$.

При визначенні параметрів перерізу зрізу під час точіння інструментом із випуклою різальною кромкою розглядалися різці, оснащені круглою різальною пластиною діаметром $d = 9,0$ та $12,7$ мм.

При різних значеннях глибини різання, подачі й радіусу різальної кромки інструменту та оброблюваного вала визначалися форма та розміри перерізу зрізу, середня товщина зрізу, співвідношення довжини стружки до її середньої товщини.

Крім того, вивчався вплив кута нахилу різальної кромки різця на величину кінематико-геометричної складової шорсткості оброблюваної поверхні.

Параметри перерізу зрізу для різця з прямолінійною різальною кромкою та різців з увігнутою різальною кромкою, отримані за алгоритмом, наведеним у [4].

Виклад основного матеріалу. При обробці точінням параметри перерізу зрізу (товщина та ширина) визначаються зазвичай виразами $a = S \cdot \sin \varphi$ і $b = t / \sin \varphi$ відповідно, де φ – головний кут у плані. Однак, зважаючи на особливості кінематики та геометричні параметри різців, які працюють за косокутною схемою різання, розрахунок товщини та ширини зрізу для процесу обробки за даними залежностями здійснити неможливо.

Достовірну якісну та кількісну оцінку параметрів перерізу зрізу при точінні за косокутною схемою різання дає аналіз схем, наведених на рис. 1, на яких показана різальна кромка різця, впроваджена у виріб, що обробляється. Товщина зрізу за цих умов чисельно дорівнює глибині різання, як і у разі, коли чистова обробка ведеться широким різцем із зачисною кромкою, довжина якої перевищує величину подачі на один оберт.

Заштрихована область на рис. 1 – проєкція перерізу зрізу на основну площину інструменту, яка збігається з передньою поверхнею різця з кутом $\gamma = 0^\circ$, що проходить через різальну кромку та вісь X , де ділянка 1-2 – лінія перетину цієї площини та обробленої на попередньому витку поверхні, що є однопорожнинним гіперболоїдом обертання, а 2-3 – лінія перетину ще необробленої поверхні (циліндра) деталі з основною площиною інструменту. Форма перерізу зрізу, обмежена різальною кромкою і кривою 1-2-3. При цьому товщина зрізу в кожній з точок леза розуміється як відстань, виміряна між різальною кромкою, розташованою на поверхні різання, і лінією 1-2-3, виміряною за нормалі до різальної кромки інструменту.

З використанням розглянутої схеми, розрахуємо товщину зрізу в кожній точці конкретної різальної кромки. З цією метою поставимо нерухому, пов'язану з оброблюваною деталлю системою координат XYZ . Нехай система $X_S Y_S Z_S$ переміщається відносно нерухомої системи зі швидкістю і зміщена вздовж осі X на відстань S , що дорівнює поздовжній подачі інструменту на один оборот деталі. У системі $X_S Y_S Z_S$, розташуємо різальну кромку інструменту на відстані r від початку координат таким чином, щоб вона була паралельна площині $X_S O_S Z_S$, і кут її нахилу щодо осі X_S дорівнював λ , а передня поверхня інструменту при цьому знаходилася б у площині $X_\lambda O_\lambda Y_\lambda$. Щоб перейти до системи

координат, пов'язаної з інструментом, сумістимо вісь X_λ з різальною кромкою, а площина $X_\lambda O_\lambda Y_\lambda$ з його передньою поверхнею за умови, що $\gamma = 0^\circ$, що рівнозначно повороту системи $X_S Y_S Z_S$ навколо осі Y_S на кут λ (рис. 2).

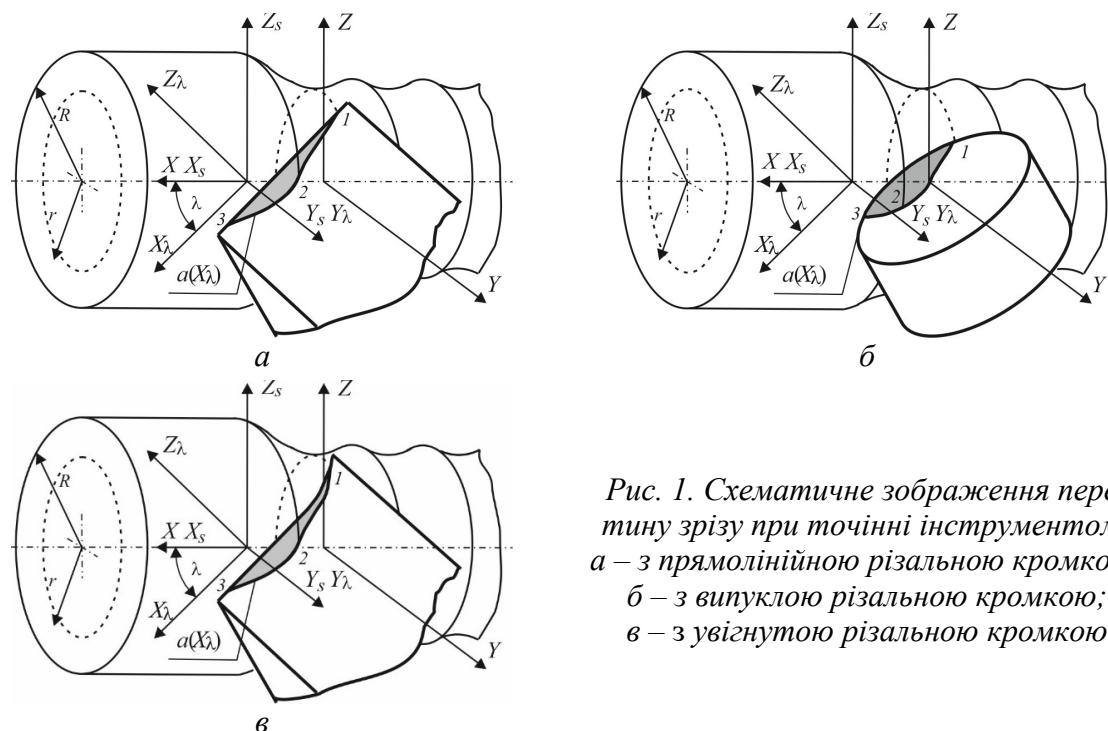


Рис. 1. Схематичне зображення перетину зрізу при точінні інструментом:
а – з прямолінійною різальною кромкою;
б – з випуклою різальною кромкою;
в – з увігнутою різальною кромкою

Враховуючи вищевикладене, запишемо матрицю переходу від $X_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$ до $X_S Y_S Z_S$:

$$\begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\lambda) & 0 & \sin(\lambda) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\lambda) & 0 & \cos(\lambda) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_\lambda \\ Y_\lambda \\ Z_\lambda \end{pmatrix}.$$

Розкриваючи матрицю перетворення систем координат, а також враховуючи, що $X_S = X - S$, $Y_S = Y$, $Z_S = Z$, запишемо вирази, що визначають перехід від системи координат $X_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$ до системи XYZ :

$$X = X_\lambda \cos(\lambda) + Z_\lambda \sin(\lambda) + S;$$

$$Y = Y_\lambda;$$

$$Z = -X_\lambda \sin(\lambda) + Z_\lambda \cos(\lambda).$$

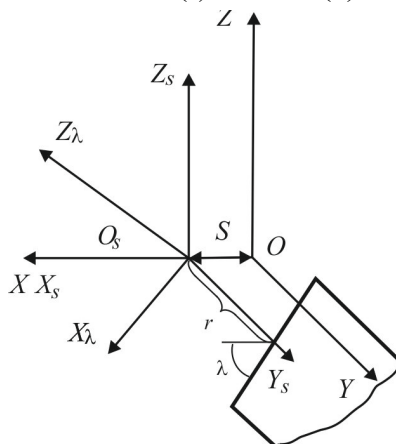


Рис. 2. Система координат, пов'язана з передньою поверхнею різця

Розрахунки для випадку інструменту з прямолінійною різальною кромкою наведено у [4]. Для випадку з інструментом із випуклою різальною кромкою розрахунки наведено нижче.

У системі XYZ рівняння, що визначає форму обробленої поверхні, утвореної обертанням утворюючої, що лежить у площині нахиленої до осі Z під кутом λ , отримаємо наступним чином:

$$\begin{cases} X_\lambda^2 + (Y_\lambda - (r + r_{pl}))^2 = r_{pl}^2 \\ Z = X \cdot tg\lambda \\ Y^2 + Z^2 = r_1(X)^2 \end{cases}$$

де r_{pl} – радіус при вершині різця; $r = R - t$, $r_1(x)$ – відстань від осі OX до точки, що лежить на різальній кромці (утворюючої); t – глибина різання.

Враховуючи, що: $X_\lambda = X / \cos\lambda$, в системі XYZ :

$$\begin{aligned} r_1(x)^2 &= y(x)^2 + z(x)^2 \\ r_1(X)^2 &= tg^2\lambda \cdot X^2 + \left[\mp \sqrt{r_{pl}^2 - \frac{X^2}{\cos^2\lambda}} + (r + r_{pl}) \right]^2. \end{aligned}$$

Звідки вираз для огинаючої поверхні (поверхні різання) отримаємо у вигляді:

$$Y^2 + Z^2 = tg^2\lambda \cdot X^2 + \left[\mp \sqrt{r_{pl}^2 - \frac{X^2}{\cos^2\lambda}} + (r + r_{pl}) \right]^2.$$

Здійснюючи перехід від системи XYZ до системи $X_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$, пов'язаної з інструментом при $Z_\lambda = 0$, отримаємо переріз поверхні різання (огинаючої) площиною в якій знаходиться різальна кромка інструменту.

$$\begin{aligned} Y_\lambda^2 + (-\sin\lambda \cdot X_\lambda)^2 &= tg^2\lambda \cdot (X_\lambda \cdot \cos\lambda)^2 + \left[\mp \sqrt{r_{pl}^2 - X_\lambda^2} + (r + r_{pl}) \right]^2; \\ Y_\lambda(X_\lambda) &= \sqrt{tg^2\lambda \cdot (X_\lambda \cdot \cos\lambda)^2 + \left[\mp \sqrt{r_{pl}^2 - X_\lambda^2} + (r + r_{pl}) \right]^2} - (\sin\lambda \cdot X_\lambda)^2. \end{aligned}$$

Цей вираз визначає форму лінії, що обмежує переріз зрізу на ділянці 1–2. Крива 1-2-3 на ділянці 2-3 є частиною еліпса, отриманого в перерізі циліндра радіусом R , площиною, нахиленою під кутом λ до його осі. Очевидно, що в системі координат $X_\lambda Y_\lambda Z_\lambda$ форма цієї кривої описується виразом:

$$\begin{aligned} \frac{Y_\lambda^2}{R^2} + \frac{X_\lambda^2 \sin^2\lambda}{R^2} &= 1, \text{ звідки} \\ Y_\lambda(X_\lambda) &= \sqrt{R^2 - X_\lambda^2 \sin^2(\lambda)} \end{aligned}$$

де $R = (r + t)$.

Розрахунок за [4] та наведений вище розрахунок дозволяють визначити форму перерізу зрізу при різних значеннях глибини різання, подачі та діаметра оброблюваної поверхні. Як бачимо з рис. 3, *a*, менші значення кута нахилу різальної кромки при менших розмірах подачі, діаметра оброблюваної поверхні і більшій глибині різання, забезпечують більш витягнуту форму перерізу зрізу. На відміну від інструменту, що має кут у плані, лінія, що обмежує площу перерізу зрізу з боку вхідної та вихідної точок інструменту з

прямолінійною різальною кромкою, на значній ділянці останньої має пологий нахил, особливо за малих λ і S . Це значною мірою позначається на умовах контактування в зоні різання, адже на таких ділянках різання буде змінюватися пружно-пластичною деформацією матеріалу та його відтисненням під задню поверхню інструмента. Якщо для випадку різця з радіусом при вершині (рис. 3, б) не враховувати зміну його проекції на основну площину різця при варіюванні кутом нахилу різальної кромки λ , безпосередньо сам цей кут не має значного впливу на форму та параметри перетину зрізу, а основним фактором в такому випадку є подача S . При збільшенні радіуса при вершині різця площа переріз зрізу значно зростає.

Слід відзначити, що величина мікронерівностей, яка розрахована, виходячи з кінематико-геометричних міркувань, для різця з випуклою різальною кромкою суттєво вище ніж для різця з прямолінійною різальною кромкою, що є негативним фактором (рис. 4, а). За рахунок зміни прямолінійної різальної кромки на увігнуту, при тій же величині подачі, можливо зменшити висоту мікронерівностей на обробленій поверхні більше ніж у десять разів (рис. 4, б).

У порівнянні з різцем з прямолінійною різальною кромкою форма перерізу зрізу при використанні різця з випуклою різальною кромкою найбільш наближена до умов обробки звичайним різцем. У такому випадку відношення довжини активної частини випуклої різальної кромки різця до середньої товщини зрізу суттєво (до трьох разів) нижчі у порівнянні з різцем з прямолінійною різальною кромкою (рис. 5). При використанні різця з увігнутою різальною кромкою активна частина увігнутої різальної кромки збільшується за рахунок наявності ділянки різальної кромки, що охоплює оброблюваний виріб, а середня товщина стружки зменшується, що суттєво збільшує величину їх відношення.

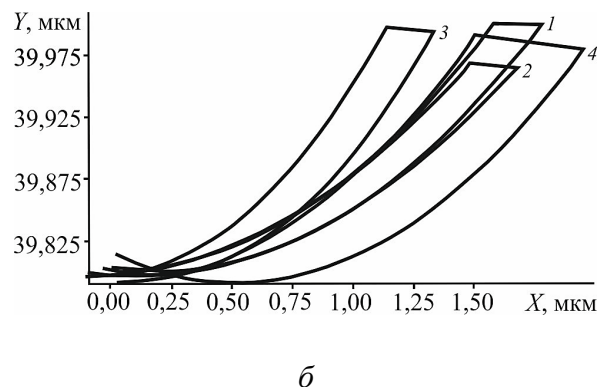
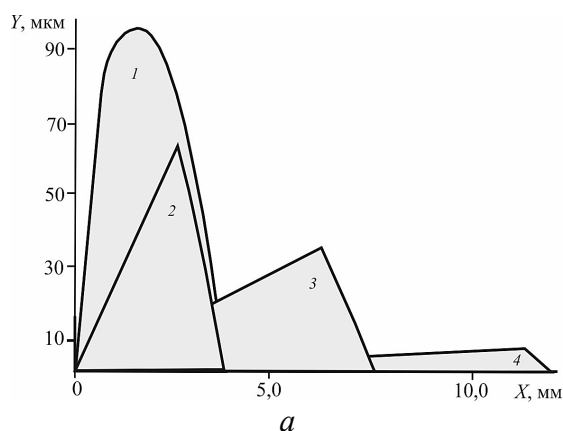


Рис. 3. Переріз зрізу під час обробки інструментом з прямолінійною різальною кромкою (1 – $S = 2,5$ мм/об; $R = 50$ мм; $t = 0,1$ мм; $\lambda = 60^\circ$; 2 – $S = 0,67$ мм/об; $R = 50$ мм; $t = 0,25$ мм; $\lambda = 60^\circ$; 3 – $S = 0,67$ мм/об; $R = 200$ мм; $t = 0,1$ мм; $\lambda = 60^\circ$; 4 – $S = 0,67$ мм/об; $R = 50$ мм; $t = 0,1$ мм; $\lambda = 15^\circ$) (а) та інструментом з випуклою різальною кромкою (1, 2 – $S = 0,2$ мм/об; 3, 4 – $S = 0,5$ мм; 1 – $\lambda = 0^\circ$, $d = 12,7$ мм; 2 – $\lambda = 50^\circ$, $d = 12,7$ мм; 3 – $\lambda = 50^\circ$, $d = 7$ мм; 4 – $\lambda = 50^\circ$, $d = 12,7$ мм) (б)

Співвідношення між величиною активної частини випуклої різальної кромки різця L і середньою товщиною зрізу $a_{\text{ср}}$ визначає ступінь рівномірності пластичної деформації за перерізом зрізу. Великі відношення $L/a_{\text{ср}}$ підвищують імовірність виникнення вібрацій у зоні різання. В усіх розглянутих випадках інструментів, що працюють за косокутною схемою різання, це співвідношення знижується при збільшенні кута нахилу різальної кромки, однак для інструментів з прямолінійною та увігнутою різальними кромками така зміна має значно інтенсивніший характер при $\lambda < 20^\circ$, а для різця з випуклою різальною кромкою – при $\lambda > 20^\circ$.

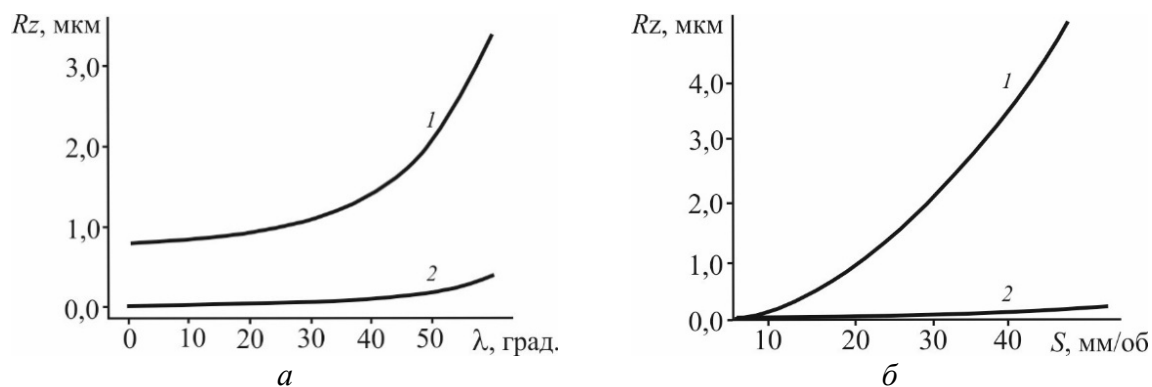


Рис. 4. Кінематико-геометрична складова шорсткості обробленої поверхні Rz ($S = 0,2$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $R = 40$ мм) залежно від кута нахилу різальної кромки (1 – різець з випуклою різальною кромкою, 2 – різець з прямолінійною різальною кромкою) (а) та від подачі (1 – різець з прямолінійною різальною кромкою; 2 – різець з увігнутою різальною кромкою) (б)

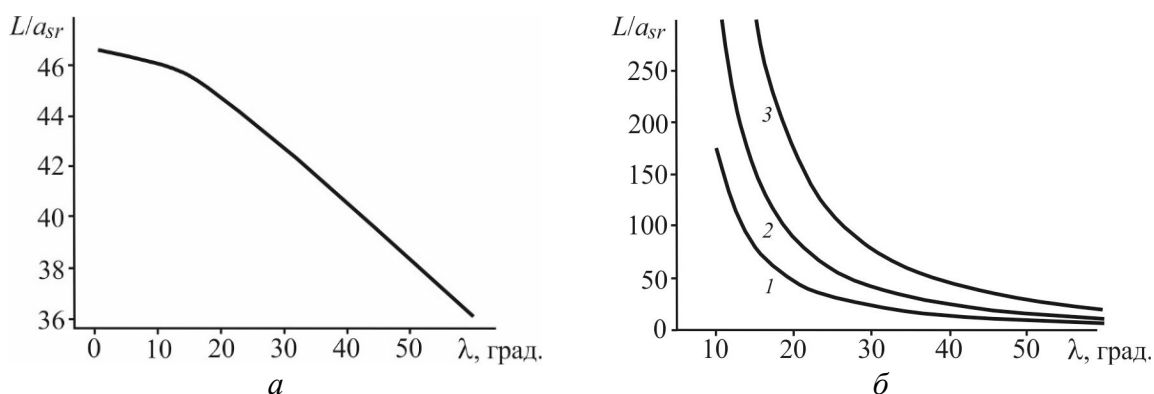


Рис. 5. Вплив кута нахилу різальної кромки різця на відношення L/a_{sr} : різець з випуклою різальною кромкою ($S = 0,5$ мм/об; $t = 0,2$ мм; $R = 40$ мм) (а), різець з прямолінійною різальною кромкою ($S = 1$ мм/об; $t = 0,15$ мм; 1 – $R = 50$ мм; 2 – $R = 100$ мм; 3 – $R = 150$ мм) (б)

Потрібно зазначити, що для випадку інструменту з прямолінійною різальною кромкою для менших значень радіуса оброблюваного виробу R , подачах S і глибинах різання t та за більших значень кута нахилу різальної кромки λ спостерігається стабілізація величини відношення довжини активної частини різальної кромки різця до середньої товщини зрізу L/a_{sr} . Останнє суттєво покращує умови роботи інструменту, зменшуючи амплітуду вимушених коливань різця, підвищуючи стабільність та вібростійкість процесу різання.

Характерні величини середньої товщини зрізу становлять 15–30, 10–20 та 20–50 μm для інструменту із прямолінійною, увігнутою та випуклою різальною кромкою відповідно за інших однакових умов ($S = 0,2$ – $0,5$ мм/об, $t = 0,1$ – $0,2$ мм, $\lambda = 40$ – 50°).

Висновки. Розглянуто форми та розміри перерізів зрізу, що мають місце у процесі фінішного точіння різцями з прямолінійною, увігнутою та випуклою різальними кромками, які працюють за схемою косокутного різання у діапазоні варіювання кута нахилу різальної кромки $\lambda = (0$ – $60)^\circ$.

Показано: відношення довжини активної частини випуклої різальної кромки різця до середньої товщини зрізу суттєво (до трьох разів) нижчі в порівнянні з таким відношенням для різця з прямолінійною різальною кромкою, а для випадку інструменту з увігнутою різальною кромкою воно більше, ніж у випадку різця з прямолінійною різальною кромкою; співвідношення довжини активної частини різальної кромки різця до середньої товщини

зрізу знижується при збільшенні кута нахилу різальної кромки, однак для інструментів з прямолінійної та увігнутою різальними кромками така зміна має значно інтенсивніший характер при $\lambda < 20^\circ$, а для різця з випуклою різальною кромкою – при $\lambda > 20^\circ$; величина мікронерівностей, яка розрахована, виходячи з кінематико-геометричних міркувань, для різця з випуклою різальною кромкою суттєво вище ніж для різця з прямолінійною різальною, а за рахунок зміни прямолінійної різальної кромки на увігнуту можливо зменшити висоту мікронерівностей на обробленої поверхні більше ніж у десять разів.

Список використаних джерел

1. Klymenko, S., & Kopeikina, M. (2020). Improvement of technologies for edge cutting machining with tools equipped with superhard structured composites. In *Modern manufacturing process and systems: Collective monograph* (Vol. 1: Fundamentals, Ch. 7, pp. 169–189). SaTCIP Publisher Ltd.
2. Клименко, С. А., Антонюк, В. С., & Саленко, О. Ф. (2025). *Надтверді матеріали інструментального призначення в автоматизованому виробництві*. Вид-во «Політехніка». <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72385>.
3. Клименко, С., & Копейкіна, М. (2021). Деякі напрямки вдосконалення процесу механічної обробки. У *Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент* (с. 8–11). Державний університет «Житомирська політехніка». <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/08/8.pdf>.
4. Мазур, М., Внуков, Ю., Грабченко, А., Доброскок, В., & Залога, В. (2025). *Основи теорії різання матеріалів*. Новий світ-2000.
5. Köhler, J. (2014). Cutting edge geometry. У *CIRP encyclopedia of production engineering* (с. 294–299). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6398.
6. Klimenko, S. A., & Manokhin, A. S. (2009). Hard “skiving” turning. *Journal of Superhard Materials*, 31(1), 42–54. <https://doi.org/10.3103/s1063457609010079>.
7. Petrushin, S. I., & Filippov, A. V. (2013). Analysis of the geometry of oblique sharpening of single-edge tools. *Obrab. Met., Tekhnol., Oborud., Instrum.*, (2), 8–14.
8. Filippov, A. V. (2015). Cut-layer cross section in oblique turning by a single-edge tool with a curved front surface. *Russian Engineering Research*, 35(5), 381–384. <https://doi.org/10.3103/s1068798x15050123>.
9. Grzesik, Wit & Żak, Krzysztof. (2011). Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials. *Archives of Materials Science and Engineering*, 52, 46–53.
10. Filippov, A. V. (2013). Constructing a model of the equivalent wedge oblique cutting edge. *Applied Mechanics and Materials*, 379, 139–144. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.379.139>.
11. Харламов, Ю., Клименко, С., Будаг'янц, М., & Полонський, Л. (2007). *Обработка деталей при восстановлении та зміцненні*. ВУНУ ім. В. Даля.
12. Ричев, С., & Девін, Л. (2019). Параметри перерізу зрізу при косокутному тонкому точінні радіусним інструментом. *Інструментальне матеріалознавство*, 22, 488–495. <https://doi.org/10.33839/2223-3938-2019-22-1-488-495>.
13. Yussefian, N. Z., Moetakef-Imani, B., & El-Mounayri, H. (2008). The prediction of cutting force for boring process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(12-13), 1387–1394. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.003>.
14. Carlsson, T., Stjernstoft, T., & Lindström, B. (2001). A model for calculation of the geometrical shape of the cutting tool — work piece interface. *CIRP Annals*, 50(1), 41–44. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62066-6](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62066-6).
15. Bushlya, V., Zhou, J., & Ståhl, J.-E. (2011). *On the analytical representation of chip area and tool geometry for the case of oblique turning with chamfered round tools. Part 1: Chip area parameters under both side and back rake angles variation*. Paper presented at Swedish Production Symposium 2011, Lund, Sweden.
16. Bushlya, V., Schultheiss, F., Gutnichenko, O., Zhou, J. M., & Ståhl, J. E. (2015). *On the analytical representation of chip area and tool geometry when oblique turning with round tools. Part 2: Variation of tool geometry along the edge line*. *Procedia CIRP*, 31, 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.082>.

References

1. Klymenko, S., Kopeikina, M. (2020). Improvement of technologies for edge cutting machining with tools equipped with superhard structured composites. *Modern manufacturing process and systems, 1: Fundamentals*, SaTCIP Publisher Ltd., Belgrade-Vrnjačka Banja (Serbia), 139–160.
2. Klymenko, S. A., Antonyuk, V. S., & Salenko, O. F. (2025). Nadtverdi materialy instrumental'nogo pryznachennya v avtomatyzovanomu vyrobnytstvi. [Superhard materials for tool applications in automated production]. *Vyd-vo "Politekhnika" – Publishing House "Politekhnika"*. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72385>.
3. Klymenko, S. A., & Kopyeykina, M. Yu. (2021). Deyaki napryamky udoskonalennya protsesu mekhanichnoyi obrobky.[Some areas for improving the machining process]. *Zbirnyk naukovykh prats XI Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii z mizhnarodnoiu uchastiu "Protsesy mekhanichnoi obrobky, verstaty ta instrument – Derzhavnyi universytet "Zhytomyrska politekhnika" – Proceedings of the XI All-Ukrainian Scientific and Technical Conference with International Participation "Machining Processes, Machine Tools and Tools* (pp. 8-11). *State University "Zhytomyr Polytechnic"* <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/08/8.pdf>.
4. Mazur, M. P., Vnukov, Yu. M., Hrabchenko, A. I., Dobroskok, V. L., & Zaloga V. O. (2025). Osnovy teoriiy rizannya materialiv [Fundamentals of the theory of cutting materials]. *Novyi svit-2000 – New World – 2000*.
5. Köhler, J. (2014). Cutting edge geometry. *Y CIRP encyclopedia of production engineering* (c. 294–299). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_6398.
6. Klimenko, S. A., & Manokhin, A. S. (2009). Hard "skiving" turning. *Journal of Superhard Materials*, 31(1), 42–54. <https://doi.org/10.3103/s1063457609010079>.
7. Petrushin, S. I., & Filippov, A. V. (2013). Analysis of the geometry of oblique sharpening of single-edge tools. *Obrab. Met., Tekhnol., Oborud., Instrum.*, (2), 8-14.
8. Filippov, A. V. (2015). Cut-layer cross section in oblique turning by a single-edge tool with a curved front surface. *Russian Engineering Research*, 35(5), 381–384. <https://doi.org/10.3103/s1068798x15050123>.
9. Grzesik, Wit & Żak, Krzysztof. (2011). Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials. *Archives of Materials Science and Engineering*, 52, 46-53.
10. Filippov, A. V. (2013). Constructing a model of the equivalent wedge oblique cutting edge. *Applied Mechanics and Materials*, 379, 139–144. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.379.139>.
11. Kharlamov, Yu.O., Klymenko, S.A., Budag'yants M.O., & Polonsky L.G. (2007). Obrobka detaley pri vidnovlenni ta zmitsnenni [Processing of parts during restoration and strengthening]. *VUNU im. V. Dalia – Volodymyr Dahl Higher Educational Institution*.
12. Devin, L.M., & Richov, S.V. (2019). Parametry pererizu zrizu pry tonkomu kosokutnomu tochinni radiusnym instrumentom.[Parameters of the cross-section of a slice during thin grinding with a radius tool]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Instrumental Materials Science*, 22, 488-495.
13. Yussefian, N. Z., Moetakef-Imani, B., & El-Mounayri, H. (2008). The prediction of cutting force for boring process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(12-13), 1387–1394. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.05.003>.
14. Carlsson, T., Stjernstoft, T., & Lindström, B. (2001). A model for calculation of the geometrical shape of the cutting tool — work piece interface. *CIRP Annals*, 50(1), 41–44. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62066-6](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62066-6).
15. Bushlya, V., Zhou, J., & Ståhl, J.-E. (2011). *On the analytical representation of chip area and tool geometry for the case of oblique turning with chamfered round tools. Part 1: Chip area parameters under both side and back rake angles variation*. Paper presented at Swedish Production Symposium 2011, Lund, Sweden.
16. Bushlya, V., Schultheiss, F., Gutnichenko, O., Zhou, J. M., & Ståhl, J. E. (2015). *On the analytical representation of chip area and tool geometry when oblique turning with round tools. Part 2: Variation of tool geometry along the edge line*. *Procedia CIRP*, 31, 423–428. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.082>.

Отримано 18.06.2025

Andrii Manokhin¹, Sergii Klymenko², Serhii Klymenko³

¹PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: the.manokhin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>

ResearcherID: DGN-4506-2022. **SCOPUS Author ID:** 37059129600

²Doctor of Technical Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Deputy Director for Research
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: atmu@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>

ResearcherID: Q-8928-2019. **SCOPUS Author ID:** 57221904325

³PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Department of Technological Management of Quality of Processing with SHM Tools
V. Bakul Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: alcon1202@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>

ResearcherID: FFQ-3675-2022. **SCOPUS Author ID:** 57197629303

PARAMETERS OF THE CROSS-SECTION OF THE CUT DURING FINISHING TURNING WITH CUTTERS OPERATING WITH AN OBLIQUE CUTTING PATTERN

This article presents a comprehensive study of the geometric parameters of chip cross-section during finishing turning using cutting tools with straight, concave, and convex cutting edges under oblique cutting conditions. A mathematical model is developed to calculate the chip cross-section shape, taking into account the intersection of the cutting edge with the previously machined surface (modeled as a single-sheet hyperboloid) and the unmachined cylindrical surface of the workpiece. The influence of cutting edge inclination angle ($\lambda = 0-60^\circ$), feed rate, cutting depth, and workpiece radius on the chip geometry is investigated.

Results show that the ratio of active cutting edge length to average chip thickness decreases with increasing λ . For straight and concave edges, this reduction is most significant at $\lambda < 20^\circ$, while for convex edges it is most pronounced at $\lambda > 20^\circ$. The convex edge generates the highest surface roughness, whereas replacing the straight edge with a concave one reduces surface micro-roughness more than tenfold. It is shown that increased values of the L/a_{sr} ratio, which characterizes the deformation distribution in the cutting zone, may lead to vibrations; however, their stabilization is achieved at specific combinations of tool geometry and cutting parameters.

The research outcomes are supported by analytical calculations and experimental validation. The findings are valuable for improving tool design and optimizing cutting conditions in high-precision machining. They contribute to enhancing surface quality, increasing process stability, and reducing tool wear in oblique cutting operations involving complex cutting tool geometries and challenging material removal conditions.

Keywords: Oblique cutting pattern; cross-sectional section; straight; concave; convex cutting edge; length of the active part of the cutting edge; chip thickness; machined surface roughness.

Fig. : 5. References : 16.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-68-86](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-68-86)

УДК 621.757:621.793

**Василь Петрович Приходько¹, Людмила Миколаївна Данилова²,
Сергій Вікторович Лапковський³, Сергій Петрович Сапон⁴,
Володимир Костянтинівич Фролов⁵, Олександр Михайлович Кравець⁶**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: privas0718@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. Researcher ID: [HDM-7277-2022](https://orcid.org/0000-0003-1852-3777)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: ldanylova@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. Researcher ID: [ADU-9265-2022](https://orcid.org/0000-0002-4442-3959)

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. Researcher ID: [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. Researcher ID: [IZE-2184-2023](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

⁵кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. Researcher ID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: om.kravets@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. Researcher ID: [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

АВТОМАТИЗОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СХЕМ ФОРМУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗМІРІВ НА ЇХНЮ ТОЧНІСТЬ

Для дослідження впливу взаємокомпенсації похибок на точність отримуваних розмірів виконано аналіз особливостей їх формування при обробленні на верстатах з ЧПК. Сформульовані умови комп'ютерного моделювання процесів оброблення. Розроблені алгоритми та спеціальна програма для моделювання, за допомогою якої виконане оцінювання впливу на точність розмірів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для різних схем їх формування. Отримані графічні та аналітичні залежності відображають вплив умов та схем оброблення на величину коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок, що необхідно враховувати при оцінюванні точності розмірів. Показано, що використання коефіцієнтів взаємної компенсації похибок забезпечує підвищення якості прогнозування точності розмірів різних типів при обробленні на токарних верстатах з ЧПК.

Ключові слова: розмірний аналіз; оцінка точності розмірів; взаємокомпенсація похибок розмірів, точність обробки.

Рис.: 9. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. При проектуванні технологічних процесів (ТП) оброблення заготовок на токарних верстатах з ЧПК важливим етапом є розмірне моделювання та аналіз ТП (РМА ТП). Одним з основних завдань РМА ТП є оцінка можливості забезпечити необхідну точність розмірних параметрів оброблюваних деталей при обраній структурі ТП. Основою для виконання такої оцінки є визначення прогнозних величин полів розсіювання технологічних і конструкторських розмірів шляхом розрахунку операційних розмірних ланцюгів. При виконанні таких розрахунків важливим є забезпечення високої якості прогнозування відповідних параметрів точності, зокрема величин полів розсіювання відповідних розмірів, наближення їх до реальних величин, оскільки отримані таким чином прогнозні оцінки точності розмірів є основою для прийняття рішень щодо структури технологічних процесів. Вирішення такої проблеми можливо за рахунок реалізації комплексу заходів, які передбачають достатньо повне врахування впливу значущих факторів, використання актуальних і достовірних статистичних даних та методологічних підходів. Існуючі методології прогнозування точності розмірів,

не є досконалими та не забезпечують необхідну повноту врахування значущих факторів, зокрема вплив, на точність отримуваних розмірів, особливостей їх формування. Зокрема це стосується взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів (ТР), внаслідок чого знижується якість прогнозування, а отже, і ефективність рекомендацій щодо шляхів поліпшення структури розроблюваних ТП. Недоліки в оцінці прогнозовної точності проявляються на етапі проектування – в необхідності забезпечення надмірних запасів точності шляхом уведення додаткового оброблення поверхонь і, як наслідок, – зниження продуктивності та підвищення собівартості оброблення на етапі виробництва.

У зв'язку з чим, дослідження та визначення параметрів взаємокомпенсації похибок, необхідних для більш повного урахування їх впливу на точність отримуваних розмірів, як одного з важливих чинників, що впливають на якість прогнозування для різних схем формування розмірів, є актуальною проблемою.

Постановка проблеми. При обробленні заготовок на верстатах з ЧПК на точність отримуваних розмірів впливає багато факторів тому при прогнозуванні, для досягнення високої якості необхідно мати якісну методологію, а також знати величини параметрів, що характеризують вплив відповідних факторів, використовуючи які можна врахувати зазначений вплив і таким чином наблизити прогнозні параметри точності до реальних значень.

Важливим фактором, урахування впливу якого може суттєво поліпшити якість прогнозування, є взаємокомпенсація похибок (ВКП) технологічних розмірів (ТР), яка має місце в процесах оброблення і яка повинна враховуватись при прогнозуванні.

Відомо, що взаємокомпенсація похибок ТР є важливим чинником, який має суттєвий вплив на точність конструкторських розмірів (КР) і який необхідно враховувати при оцінці їхньої точності [1-3]. Неврахування або неповне врахування взаємокомпенсації призводить до неякісної оцінки точності КР та ТП загалом, щодо можливості забезпечити задану точність розмірів і, як наслідок, – до помилкових рекомендацій щодо необхідності коригування ТП.

Величина ВКП та ступінь її впливу залежить від схем формування розмірів і методики її виявлення та врахування при прогнозуванні. На сьогодні явище ВКП для різних схем формування розмірів вивчено недостатньо. Це проявляється в обмеженості або відсутності інформації щодо коефіцієнтів ВКП, які необхідні для оцінки та урахування їхнього впливу при прогнозуванні точності розмірів, отримуваних при обробленні. Для визначення та урахування величини коефіцієнтів ВКП необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на виявлення їхнього впливу на точність розмірів, для різних типів розмірів, схем, способів їх формування та умов оброблення. Також необхідно отримання кількісних значень параметрів ВКП, які б дозволили врахувати зазначений вплив при розрахунках прогнозних оцінок точності.

Оцінка впливу факторів на точність отримуваних розмірів може бути виконана декількома методами: 1) на основі аналітичного аналізу та розрахунків; 2) на основі аналізу експериментально – статистичних даних, що характеризують точність процесів оброблення; 3) на основі результатів комп'ютерного моделювання та аналізу процесу оброблення.

Кожний із зазначених методів має свої переваги та недоліки, тому розумною стратегією дослідження слід вважати комплексне їх використання, що дозволить повніше дослідити процеси, а також перевірити та підтвердити коректність результатів та висновків, отриманих різними методами, краще і повніше використати переваги кожного із них. У цій роботі використовувались: попередній аналітичний аналіз (для визначення умов машинного моделювання), комп'ютерне моделювання з використанням розробленої і представленої в роботі програми та методологія на основі використання експериментально-статистичних даних для підтвердження коректності комп'ютерного моделювання.

Отримання в результаті досліджень кількісних оцінок параметрів ВКП для різних схем формування розмірів, визначення впливу на їхню величину умов оброблення, а також розроблення рекомендацій та демонстрація прикладів їх використання у практичній діяльності, при використанні різних способів формування розмірів дозволить підвищити якість прогнозування, а отже, і якість розроблюваних технологічних процесів оброблення заготовок на токарних верстатах із ЧПК.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теорії і практиці сучасного машинобудівного виробництва різним аспектам РМА ТП і аналізу конструкцій деталей, вузлів та складальних одиниць приділяється значна увага, про що свідчать наукові та науково-методичні публікації, у яких висвітлюється вирішення різних завдань та наводяться результати досліджень [1-8].

Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів [1-6] є однією зі складових проєктування ТП, яка впливає не тільки на рівень якості ТП щодо забезпечення вимог до точності розмірів, а є також інструментом створення раціональної структури ТП.

Використання РМА ТП сприяє створенню більш досконалих ТП виготовлення деталей та складання вузлів і машин, які забезпечують також підвищення продуктивності та зниження собівартості оброблення. Це вимагає подальшого вдосконалення методології РМА ТП для підвищення продуктивності процесів аналізу та оцінювання, що досягається автоматизацією основних процедур [2; 8; 9; 13-15] і для поліпшення якості та достовірності відповідних оцінок, рекомендацій, спрямованих на вдосконалення відповідних ТП.

В умовах широкого використання верстатів з ЧПК важливе значення має якісна оцінка прогнозної точності на етапі проєктування ТП, яка є основою для формування структури операцій та ТП в цілому, а отже, впливає на забезпечення не тільки точності розмірів, а й на продуктивність та собівартість оброблення.

Основними напрямками досліджень та вдосконалення методології оцінки точності розмірів є автоматизація та формалізація процедур РМА ТП [2; 7-9; 13], отримання та актуалізація даних про точність розмірів при різних процесах та способах оброблення [1-4; 10-12], вдосконалення методології оцінки прогнозної точності на основі дослідження та отримання нових даних [8; 13-15].

Незважаючи на визнання істотного впливу ВКП технологічних розмірів на точність конструкторських розмірів [1-6; 13], при оцінюванні такого впливу та визначенні прогнозної точності немає єдиної формалізованої методології. Є тільки обмежена кількість необхідних статистичних параметрів, що характеризують ВКП, зокрема величин та коефіцієнтів ВКП, які необхідні для її урахування та виконання такої оцінки.

У зв'язку з цим за способом урахування ВКП, на даний час використовуються різні методологічні підходи.

1. На основі використання коефіцієнтів ВКП та формальних розрахунків з використанням відповідних операційних розмірних ланцюгів (ОРЛ) [2; 13; 14].
2. На основі використання «замикаючих – замінюючих» ланок ОРЛ [1; 3].
3. На основі виявлення та розрахунку пов'язаних ОРЛ [3; 4].

Загальною проблемою для всіх наведених методів урахування ВКП є обмеженість даних та інформації, необхідних для їх практичного використання. Крім того, при використанні останніх двох методів не вирішується проблема формалізованого визначення технологічних допусків складових ланок, має місце також їх складність та трудомісткість, що є перешкодою для автоматизації [13]. Через зазначені проблеми, на практиці, у деяких випадках, взаємокомпенсацію похибок ТР взагалі не враховують, а отримані попередні результати додатково уточнюють у процесі впровадження ТП, що призводить до збільшення витрат. Тому такий підхід використовують тільки для попередньої узагальненої оцінки ТП.

Отже, на сьогодні одним із дієвих способів підвищення якості оцінки прогнозованої точності отримуваних розмірів є більш повне урахування впливу схем їх формування та взаємокомпенсації похибок ТР на основі методології використання коефіцієнтів ВКП. Така методологія дозволяє формалізувати процеси виявлення в операційних розмірних ланцюгах складових ланок – технологічних розмірів із ВКП, а також виконати розрахунок прогнозних оцінок точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів з урахуванням ВКП. Завдяки цьому вона є у наш час найбільш прийнятною при проведенні РМА ТП, у тому числі для автоматизації відповідних процедур. Для її використання необхідними умовами є можливість визначення величини коефіцієнтів ВКП, що відповідають умовам оброблення та наявність достатньої кількості актуальних довідкових даних, що характеризують параметри точності процесів та способів оброблення деталей. Дані, що характеризують середню економічну точність, на теперішній час представлені достатньо широко [1; 2; 3; 10-12], але у зв'язку з оновленням конструкцій верстатів доцільна їх періодична актуалізація. Вибір величини коефіцієнтів ВКП для різних схем і умов формування розмірів через обмеженість або повну відсутність відповідних даних є проблематичним. Водночас виявлення та знання такого впливу повинно забезпечити більш якісний вибір величин коефіцієнтів ВКП з урахуванням конкретних умов оброблення, а в підсумку – підвищення точності прогнозування.

На цей час є деяка кількість даних [1; 2; 13] щодо величини коефіцієнтів ВКП при обробленні одним інструментом, які визначалися на основі використання експериментально-статистичних даних, що характеризують точність різних способів оброблення [1-4; 10-12]. Одержані таким чином значення потребують подальшого дослідження для виявлення впливу на їхню величину різних факторів, що характеризують процес оброблення і потребують підтвердження з використанням інших методів дослідження. Для окремих схем оброблення, наприклад, для схем формування розмірів набором інструментів дані щодо коефіцієнтів ВКП, на цей час, взагалі відсутні. Це є перешкодою для широкого використання зазначеної методології урахування ВКП і для усунення якої необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на визначення кількісних оцінок коефіцієнтів ВКП для різних умов оброблення, що і було предметом досліджень, результати яких представлені в цій статті.

Виявлення та знання такого впливу повинно забезпечити більш якісний вибір величин коефіцієнтів ВКП з урахуванням конкретних умов оброблення, що в підсумку забезпечить підвищення точності прогнозування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. На теперішній час недостатньо вивчений і потребує дослідження вплив схем формування розмірів та факторів, що характеризують процес оброблення на величину коефіцієнтів ВКП. Відомі певні рекомендації щодо величин коефіцієнтів ВКП при формуванні розмірів обробленням одним різцем за програмою ЧПК, але відсутні моделі впливу умов оброблення. Для підвищення якості прогнозованої оцінки точності розмірів на основі урахування коефіцієнтів ВКП необхідно проведення дослідження інших схем формування розмірів із визначенням значень відповідних коефіцієнтів ВКП, а також з отриманням моделей впливу різних факторів на величини коефіцієнтів ВКП. Зокрема це стосується дослідження схем формування розмірів набором інструментів з одностороннім та різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях.

Через відсутність залежностей, що відображають вплив різних факторів на величину ВКП і, зокрема, на величину коефіцієнтів ВКП, неможливо вибрати оптимальне їх значення, яке б враховувало умови оброблення. Усі перелічені чинники знижують якість оцінки прогнозованої точності оброблення та вказують на необхідність проведення подальших досліджень спрямованих на вирішення перелічених завдань.

Аналіз виконання оцінки прогнозної точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів, при розмірному моделюванні технологічних процесів, свідчить про те, що на практиці не повною мірою враховуються особливості їх формування. Зокрема, недостатньо враховується ВКП технологічних розмірів, що знижує достовірність прогнозних оцінок точності та може призвести до необґрунтованих висновків щодо здатності розроблених ТП забезпечити необхідну точність конструкторських розмірів або щодо необхідності та напрямків їх можливого поліпшення. При неврахуванні такого ефекту розрахунков показе значну величину розсіювання розміру A , яка може перевищити величину допуску, при реальній меншій або незначній величині такого розсіювання. Проблема в тому, що для більшості схем, способів та методів оброблення значення коефіцієнтів ВКП визначені тільки для окремих випадків, або невідомі. Крім того, відсутні моделі впливу умов оброблення на їхню величину, що обмежує можливості оптимального вибору коефіцієнтів, відповідно до умов оброблення.

Для вирішення зазначеної проблеми та для визначення величини коефіцієнтів ВКП при токарному обробленні, з урахуванням впливу факторів, що характеризують процес оброблення, була розроблена спеціальна програма для моделювання розсіювання величин технологічних розмірів та ВКП залежно від зміни факторів процесу оброблення для отримання відповідних моделей.

Мета статті – моделювання процесів формування розмірів для оцінки впливу різних факторів на величину взаємної компенсації похибок технологічних розмірів. Визначення величини коефіцієнтів, що її характеризують, необхідних для урахування взаємокомпенсації при прогнозуванні точності отримуваних розмірів. Розроблення рекомендацій щодо використання отриманих результатів для прогнозування точності розмірів при обробленні на токарних верстатах.

Виклад основного матеріалу. Моделювання процесів формування розмірів, на основі створення алгоритмів та розроблення спеціальної програми, виконувалось для оцінки впливу різних факторів на величину ВКП технологічних розмірів. У процесі дослідження визначались величини ВКП, розраховувались коефіцієнти ВКП для різних схем і умов формування розмірів, на основі чого оцінювався вплив на них різних факторів. Отримані на основі досліджень моделі будуть використовуватись для отримання параметрів ВКП, що необхідні для проведення прогнозних розрахунків і оцінок точності отримуваних розмірів у різних умовах оброблення.

У цій роботі для визначення та оцінки впливу параметрів ВКП на точність розмірів різних типів виконувалось комп'ютерне моделювання з використанням розробленої авторами програми. Крім того, для підтвердження коректності моделювання в окремих випадках була використана методологія визначення параметрів ВКП на основі експериментально-статистичних даних [13].

Розроблена програма моделює оброблення з урахуванням впливу пружних деформацій технологічної системи, внаслідок коливання припусків та твердості заготовок, на розсіювання величин технологічних розмірів та ВКП. Вона імітує оброблення і отримання лінійних розмірів за трьома схемами формування:

- 1) послідовне оброблення двох поверхонь одним різцем по програмі ЧПК;
- 2) оброблення набором різців двох поверхонь з однаковим (одностороннім) розташуванням припусків;
- 3) оброблення набором різців двох поверхонь з різностороннім (один – ліворуч, другий – праворуч від оброблюваної поверхні) розташуванням припусків.

Програма обчислює значення технологічних і конструкторських розмірів кожної заготовки встановленої вибірки, розраховує величини полів розсіювання технологічних розмірів $\omega F1, \omega F2$ і конструкторського розміру $\omega A1$, а також величину взаємокомпенсації похибок ω_k .

Вихідними даними для роботи програми є: геометричні параметри заготовки; фізико-механічні характеристики заготовки; параметри, що характеризують ТОС; параметри процесу різання; схема формування розмірів. Для виконання перелічених завдань програма реалізує відповідні алгоритми.

З використанням комп'ютерного моделювання досліджувались наступні схеми формування конструкторського розміру (КР) $A1$:

- 1) з послідовним обробленням одним різцем за програмою ЧПК двох поверхонь з одностороннім розташуванням припусків, відповідно до схеми (рис. 1) [13];
- 2) формування розміру обробленням набором інструментів:
 - а) двох поверхонь з одностороннім розташуванням припусків (рис. 2);
 - б) двох поверхонь із різностороннім розташуванням припусків згідно зі схемою (рис. 3);
- 3) виконувався аналіз схеми (рис. 3) з послідовним обробленням різцями за програмою ЧПК двох поверхонь із різностороннім розташуванням припусків.

Для представлення програми моделювання розглянемо механізми та особливості формування КР $A1$ при використанні різних схем формування розмірів.

В усіх випадках рівняння операційних розмірних ланцюгів, що описуватимуть формування КР $A1$ матимуть такий вираз:

$$[A] = -F1 + F2. \quad (1)$$

У схемах одностороннього розташування припусків на оброблюваних поверхнях, при обробленні одним інструментом (рис. 1) та набором інструментів (рис. 2), які брали до уваги в процесі досліджень, при одержанні технологічних розмірів $F1, F2$ коливання положень їх вимірювальних баз, а також оброблюваних поверхонь значною мірою викликані тими ж самими причинами (факторами), наприклад, наявністю пружних деформацій $\Delta x = \Delta P_x / C_x$.

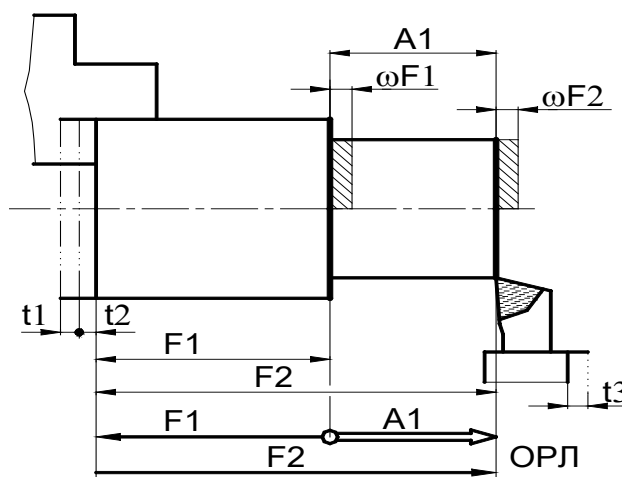


Рис. 1. Схема формування розміру $A1$ послідовним обробленням двох поверхонь одним різцем по програмі ЧПК та відповідний ОРЛ [13]

Наявність відповідних пружних деформацій і виникнення похибки установки заготовки, наприклад, внаслідок похибок базування, закріплення та пристрою буде викликати синхронне зміщення вимірювальної бази (лівого торця деталі) на величини $t1, t2$ і внаслідок чого однакову зміну обох технологічних розмірів $F1$ і $F2$, а оскільки вони є складовими ланками різних типів ($F1$ – зменшуюча, $F2$ – збільшуюча), це приведе до повної взаємної компенсації таких похибок.

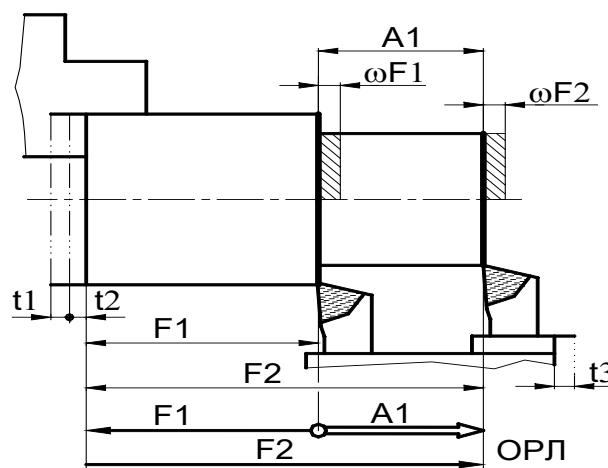


Рис. 2. Схема оброблення набором інструментів та розмірний ланцюг, що описує розмірні зв'язки (одностороннє розташування припусків)

Джерело: розроблено авторами.

Таке ж синхронне зміщення в протилежному напрямку, внаслідок пружних деформацій (t_3) одного різця чи набору різців з інструментальним блоком, будуть мати обидві оброблювані поверхні, наслідком чого буде синхронна зміна (збільшення) технологічних розмірів F_1 , F_2 . Величини зміни розмірів F_1 , F_2 , внаслідок зміщення різальних кромek обох різців можуть відрізнятись на деяку величину, через це, а також через наявність можливого впливу інших факторів, буде мати місце значна, але не повна, а часткова компенсація відповідних похибок. Зауважимо, що механізми взаємокомпенсації при обробленні поверхонь з одностороннім розташуванням припусків одним різцем і набором інструментів будуть подібними і відповідатимуть представленому вище.

У той же час, можна очікувати, що внаслідок зв'язаності різців в інструментальній наладці, їх зміщення внаслідок деформацій будуть відзначатись більшою синхронністю як за напрямом, так і за величиною, наслідком чого може бути більша величина ВКП ТР. Цю гіпотезу доцільно перевірити за результатами комп'ютерного моделювання.

Для окремої конкретної деталі, з урахуванням відповідних похибок (відхилень t_i), переважно викликаних пружними деформаціями, величина КР A_1 згідно з (1) буде дорівнювати:

$$[A_i] = -(F1_i + t1 + t2 + t3_1) + F2 + t1 + t2 + t3_2 = -F1 + F2 - t3_1 + t3_2.$$

Для спрощення позначимо похибки технологічних розмірів F_1 , F_2 в i -му випробуванні відповідно: $\Delta 1_i = t3_1$; $\Delta 2_i = t3_2$.

Тоді сумарна похибка конструкторського розміру A_1 в кожному випробуванні буде визначатись на основі отриманих комп'ютерним моделюванням похибок ТР таким чином:

$$\Delta A1_i = -\Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (2)$$

Отримана таким чином величина похибки КР A_1 вже буде враховувати взаємокомпенсацію похибок ТР, тобто:

$$\Delta A1_{ik} = -\Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (3)$$

Таким чином, це означає, що розраховане поточне значення $\Delta A1_{ik}$ в i випробуванні буде: $A1_{ik} = -F1_i + F2_i$. При різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях, зв'язаних КР A_1 (рис. 3) напрями переміщення різальних кромek різців будуть протилежними, а отже, і похибки ТР при визначенні похибок конструкторського розміру A_1 повинні додаватись:

$$\Delta A1_i = \Delta 1_i + \Delta 2_i. \quad (4)$$

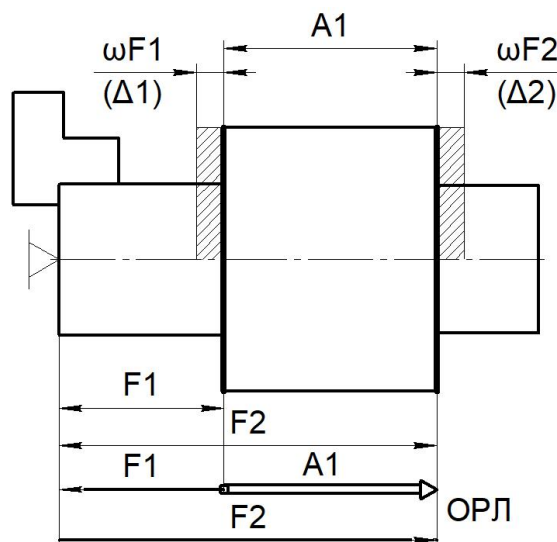


Рис. 3. Схема оброблення (різностороннє розташування припусків) та розмірний ланцюг, що описує розмірні зв'язки

Джерело: розроблено авторами.

Величини елементарних похибок у кожному випробуванні розраховувались з урахуванням коливання твердості та припуску при обробленні кожної поверхні відповідної заготовки та значень параметрів процесу різання, ТОС, фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки, які враховувались при визначенні відповідних сил різання та деформацій.

Таким чином, для кожної вибірки результати випробувань формувались на основі заданих (незмінних) умов оброблення (схема формування розмірів, режими різання, жорсткість ТОС, параметри інструменту, характеристики заготовки), але з імітацією коливання твердості й величин припусків.

Колівання припуску відтворювалось наступним чином: для вибраної схеми оброблення, з урахуванням допуску на відповідний розмір заготовки, визначалось мінімальне значення припуску h_{min} до якого додавалась частка допуску, розрахована за допомогою випадкового числа, згенерованого програмою:

$$h_i = h_{min} + x \cdot [ES - EI]_i, \quad (5)$$

де x – випадкове число, $x \in [0; 1]$, ES та EI – відповідно верхнє та нижнє граничні відхилення розміру, мм.

Колівання твердості оброблюваних поверхонь реалізовано аналогічно, тобто визначалось мінімальне значення твердості матеріалу HB_{min} , задане у вихідних даних, а до нього додавалось значення частини інтервалу ($HB_{max} - HB_{min}$), розраховане за допомогою згенерованого випадкового числа:

$$HB_1 = HB_{min} + y \cdot [HB_{max} - HB_{min}], \quad (6)$$

де y – випадкове число, $y \in [0; 1]$, HB_{max} та HB_{min} – максимальне та мінімальне значення твердості матеріалу.

У програмі прийнято коливання твердості $\Delta HB = 10\%$ – в межах однієї деталі, а саме $HB_2 = HB_1 \pm 5\%$. Величину HB_2 отримують також з використанням генератора випадкових чисел. Аналогічний підхід використовувався при визначенні припусків. Таким чином відтворювався вплив зазначених факторів на точність розмірів, оскільки це має місце та характеризує реальні умови оброблення і є основною причиною виникнення відмінностей умов оброблення, а отже, і величин похибок отримуваних розмірів $F1$, $F2$.

З урахуванням того, що програма імітує отримання лінійних розмірів з обробленням торцевих поверхонь, для кожного випробування у вибірці з урахуванням відповідних коливань глибини різання і твердості заготовки розраховувалась величина сили різання P_x в напрямку осі x за загальновідомою залежністю [16]:

$$P_x = 9,8 C_p h^x f_o^y V^n k_p, \quad (7)$$

де C_p – постійний коефіцієнт, x, y, n – показники степені, що враховують вид обробки, матеріал різальної частини інструменту та фізико-механічні властивості матеріалу заготовки, h – глибина різання, мм; f_o – подача на оберт, мм/об, V – швидкість різання, м/хв, k_p – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу та геометричні параметри різальної частини інструмента.

Далі з урахуванням відповідних величин сили різання при обробленні поверхонь з витримуванням розмірів $F1, F2$, на основі заданої жорсткості системи C_x в напрямку осі x , розраховувались відповідні похибки: $\Delta_{ij} = P_{xij}/C_x$, де Δ_{ij} – похибка при обробленні j -ї поверхні, i -ї деталі. У цьому випадку ($\Delta_{1i}; \Delta_{2i}$).

Використовуючи представлений алгоритм, у програмі моделювалися та формувалися відповідні вибірки похибок технологічних розмірів $F1, F2$, які використовувались для розрахунків похибок конструкторського розміру $A1$. При цьому для схем оброблення поверхонь з одностороннім розташуванням припусків та для встановлених у вихідних даних умов оброблення, значення похибок конструкторського розміру $A1$ розраховувались на основі рівняння (3), з урахуванням взаємокомпенсації похибок ТР. Для схем оброблення з різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях значення похибок конструкторського розміру $A1$ розраховувалось з використанням рівняння (4).

Для оцінки точності та подальшого аналізу, з використанням, отриманих у вибірці, похибок відповідних розмірів, згідно з наведеним алгоритмом для кожної вибірки розраховувались значення середньоквадратичних відхилень S_i (8), а потім величини полів розсіювання ($\omega F_i = 6S_i$) технологічних розмірів $\omega F1, \omega F2$, а також величина поля розсіювання конструкторського розміру з урахуванням взаємокомпенсації похибок ($\omega A1_k = 6S_k$).

$$S_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{N-1}}. \quad (8)$$

де N – заданий обсяг вибірки (кількість випробувань); Δ_i – похибка розміру; $\bar{\Delta}$ – середнє арифметичне похибок розміру.

Подальший розрахунок параметрів, що характеризують величини ВКП, виконувався за програмою з використанням такого алгоритму:

1. За отриманими величинами $\omega F1, \omega F2$ та рівнянням (1) розраховувалась прогнозна величина поля розсіювання КР $\omega A1$ без урахування ВКП технологічних розмірів:

$$[\omega A1] = \omega F1 + \omega F2. \quad (9)$$

2. Розрахункова величина поля розсіювання КР $\omega A1_p$, з урахуванням ВКП технологічних розмірів, може бути визначена з використанням рівняння (10) [1; 2; 13] на основі, отриманих значень величин $\omega F1, \omega F2$ та невідомої величини ВКП (ω_k):

$$[\omega A1_p] = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k. \quad (10)$$

3. Для визначення величини ВКП (ω_k), отриману комп'ютерним моделюванням величину поля розсіювання конструкторського розміру, з урахуванням взаємокомпенсації ($\omega A1_k$), прирівнювали до правої частини рівняння (10):

$$[\omega A1_k] = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k. \quad (11)$$

4. З рівняння (11) знаходили величину взаємокомпенсації похибок ТР для заданих умов оброблення:

$$2\omega_k = \omega F1 + \omega F2 - [\omega A_k]. \quad (12)$$

5. Розраховували величину коефіцієнта взаємокомпенсації k , як частки від меншої величини поля розсіювання ТР: прийнято, що $2\omega_k = 2 \cdot k \cdot \omega F_i$, відповідно $\omega_k = k \cdot \omega F_i$, а коефіцієнт ВКП визначався як $k = \omega_k / \omega F_i$.

Відзначимо, що використання в прогностичних розрахунках відносної характеристики взаємокомпенсації похибок, а саме: коефіцієнта взаємокомпенсації похибок k є більш ефективним, зручним і універсальним у порівнянні з абсолютними величинами взаємокомпенсації. Такий підхід при виконанні розрахунків прогностичної точності дозволяє розширити сферу його застосування, а також зменшити чутливість отриманих результатів і висновків до зміни умов оброблення, можливих похибок у розрахунках сил різання, жорсткості ТОС та інших параметрів, оскільки їх зміни будуть відноситись до оброблення обох зв'язаних розміром поверхонь. Зазначені зміни факторів можуть спричиняти зміну абсолютних значень величинами взаємокомпенсації, але значно менше впливатимуть на величину коефіцієнта взаємокомпенсації похибок, що підвищує його стійкість до зміни умов оброблення.

Водночас час є фактори, які мають істотний вплив на величину коефіцієнта ВКП, зокрема, одним із таких факторів є схема формування конструкторського розміру.

Для вивчення впливу схем формування КР на величину ВКП у програмі реалізовано окреме моделювання різних схем.

Таким чином, у результаті моделювання, згідно із заданими умовами оброблення (рис. 4), для кожної вибірки отримували протокол результатів, що містить значення відхилень розмірів F1, F2, A1, відповідно $\Delta 1_i$, $\Delta 2_i$, $\Delta A1_{ik}$ чи $\Delta A1_i$ та результати розрахунків $\omega F1$, $\omega F2$, $\omega A1_k$, що виводяться на екран у формі таблиці (рис. 5) після натискання кнопки «Оброблення результатів».

Оцінювання точності та взаємокомпенсації похибок розміру

Вихідні дані

Характеристика заготовки

	D1, мм	D2, мм	D3, мм	Розмір F1, мм	Розмір F2, мм
Номінал, розмір	55	44	34	55	106
Верхнє відх.	0,5	0,4	0,3	0,5	0,6
Нижнє відх.	-0,25	-0,2	-0,15	-0,25	-0,3

Матеріал заготовки: **Сталь конструкційна**

Твердість, НВ
Мінімальна: 190
Максимальна: 210

Параметри технологічної системи

Жорсткість супорта, Н/мм: 10000

Виліт різця, мм: 20

Розміри державки, ВхН: 16х12

Режими різання

Глибина різання, мм: 0,5

Подача, мм/об: 0,3

Частота, об/хв: 1000

Параметри деталі

	D1, мм	D2, мм	D3, мм	Розмір F1, мм	Розмір F2, мм
Номінал, розмір	50	40	30	50	100
Допуск [мм]	0,12	0,1	0,08	0,2	0,22

Схема оброблення

☒ Послідовне оброблення за програмою

☐ Оброблення з поперечною подачею

☐ Оброблення з поздовжньою подачею

Характеристика різця

Матеріал різця: **T15K6**

Кут в плані φ, °: 93

Розмір партії деталей

Кількість деталей N, шт: 50

Розрахунок Результат Вихід

Рис. 4. Інтерфейс програми для схеми формування розміру за програмою ЧПК, з одностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях Джерело: розроблено авторами.

Оброблення даних	$\omega F1$	$\omega F2$	$\omega A1$	ωk
Вихід	0,092	0,1	0,055	0,068

Рис. 5. Приклад фрагмента таблиці результатів моделювання

Джерело: розроблено авторами.

Завданням цих досліджень було визначення впливу різних факторів та умов оброблення на величину коефіцієнта ВКП. Для кожного випробування та умов формування розмірів, з метою забезпечення адекватних результатів, виконувалось триразове повторення моделювання. На основі отриманих результатів розраховувались середні значення величини коефіцієнтів взаємокомпенсації, які використовувались при формуванні та представленні графічних і математичних моделей впливу відповідних факторів, а також при аналізі результатів та розробленні відповідних рекомендацій. Приклади представлення отриманих результатів для різних умов формування розмірів наведено в табл. 1, а також у вигляді графічних залежностей, показаних нижче.

Таблиця 1 – Результати розрахунків коефіцієнтів взаємокомпенсації k – оброблення набором інструментів поверхонь з одностороннім розташування припусків

№ випробування	№ з/п	$\omega F1$	$\omega F2$	$\omega A1$	ωk	k_i	$k_{ср}$
1	1	0,076	0,095	0,038	0,066	0,868	
	2	0,073	0,088	0,095	0,060	0,822	0,848
	3	0,069	0,083	0,095	0,059	0,855	
2	1	0,065	0,076	0,040	0,050	0,769	
	2	0,077	0,109	0,047	0,069	0,896	0,853
	3	0,085	0,113	0,045	0,076	0,894	

Джерело: розроблено авторами.

У процесі комп'ютерного моделювання досліджувався вплив на величину ВКП схем формування розмірів, елементів режимів різання (глибини, швидкості різання, подачі), жорсткості інструментальної наладки C , фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки (НВ).

Для обмеження кількості факторів та відсіювання незначущих були виконані попередні дослідження. Вони показали практично повну відсутність впливу на величину коефіцієнта взаємокомпенсації похибок k швидкості різання та схеми формування розміру при обробці різцем по програмі ЧПК, у випадку різностороннього розташування припусків на оброблюваних поверхнях (рис. 3). Також встановлено незначний вплив на величину коефіцієнта k ВКП твердості матеріалу заготовки та схеми формування розміру набором різців, для випадку різностороннього розташування припусків, у межах зміни величини k на 0,05. На підставі таких висновків, величини перелічених факторів не змінювались, а зазначені схеми формування розмірів з різностороннім розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях надалі не досліджувались, але були відображені в загальних рекомендаціях.

Попередні результати моделювання засвідчили значний вплив схеми формування розмірів на величину коефіцієнта k ВКП ТР, тому в усіх дослідженнях розглядався та представлявся вплив відповідного фактору для двох схем формування розмірів обробленням: одним різцем за програмою ЧПК та набором інструментів, встановлених в інструментальній наладці, при односторонньому розташуванні припусків, що й відображено на графіках. На всіх графіках, наведених нижче: k_1 – коефіцієнт ВКП, що відповідає обробленню з формуванням розміру одним інструментом за програмою ЧПК; k_2 – коефіцієнт ВКП, що відповідає обробленню та формуванням розміру набором інструментів.

Для підвищення інформативності та якості аналізу, залежності, що відображають вплив різних факторів на величину коефіцієнтів ВКП, представлені графічно з відповідною апроксимацією, а також у формі математичних моделей із розрахунками коефіцієнтів множинної кореляції R^2 , для оцінки якості апроксимації моделей.

Відзначимо, що вплив практично усіх досліджених факторів представлений лінійними моделями, які, судячи зі значень коефіцієнтів кореляції R^2 , достовірно відображають такий вплив.

З урахуванням найбільшого впливу на величину k_i двох схем формування ТР на всіх графіках представлялись залежності для зазначених схем, що наочно демонструє різницю їх впливу. Вагомість та напрям впливу кожного фактору оцінювались на основі аналізу графіків та відповідних моделей, зокрема аналізувались величина і знак коефіцієнтів у першому члені математичної моделі ($y_i = a_i x_i + b_i$). Аналіз виконувався для факторів, що залишились після попереднього відсіювання.

На підставі оцінки результатів, за описаною вище методологією, можна відзначити, що має місце істотний вплив жорсткості ТОС, збільшення якої приводить до зменшення величин коефіцієнта ВКП – як при чорновому, так і при чистовому обробленні. При цьому необхідно відзначити більший вплив жорсткості на величини коефіцієнтів k_1 і k_2 у випадку використання інтенсивних режимів різання (чорнове точіння), який полягає в більшому зменшенні коефіцієнтів ВКП (рис. 6).

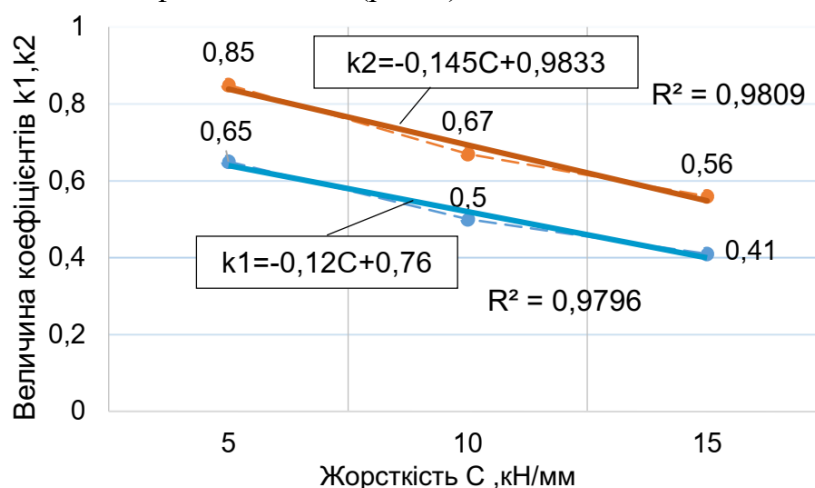


Рис. 6. Вплив жорсткості інструментальної наладки C на зміну величини коефіцієнтів взаємної компенсації похибок k_1 та k_2 при чорновому обробленні ($h = 4$ мм, $f_o = 0,9$ мм/об., HB170-190)

Джерело: розроблено авторами.

У розглянутому діапазоні зміни величини жорсткості C у випадку чорнового оброблення величини коефіцієнтів ВКП k зменшувались на $\Delta k_1 = 0,26$, $\Delta k_2 = 0,29$. Значення коефіцієнтів при C : $a = -0,145$ для k_1 ; $a = -0,12$ для k_2 свідчать про однаковий за напрямом і приблизно рівний за величиною вплив жорсткості для обох схем формування розмірів. Різниця величин вільних членів моделей відображає вплив схем формування розмірів і свідчить про більшу величину ВКП при обробленні набором інструментів. Високі значення коефіцієнтів кореляції R^2 вказують на хорошу якість лінійних моделей, що відображають вплив жорсткості на величини коефіцієнтів взаємної компенсації похибок k_1 та k_2 .

Вплив режимів різання – глибини різання h і подачі f_o значно менший, ніж вплив жорсткості C інструментальної наладки, про що свідчать суттєво менші значення коефіцієнтів при x у відповідних моделях (рис. 7-8).

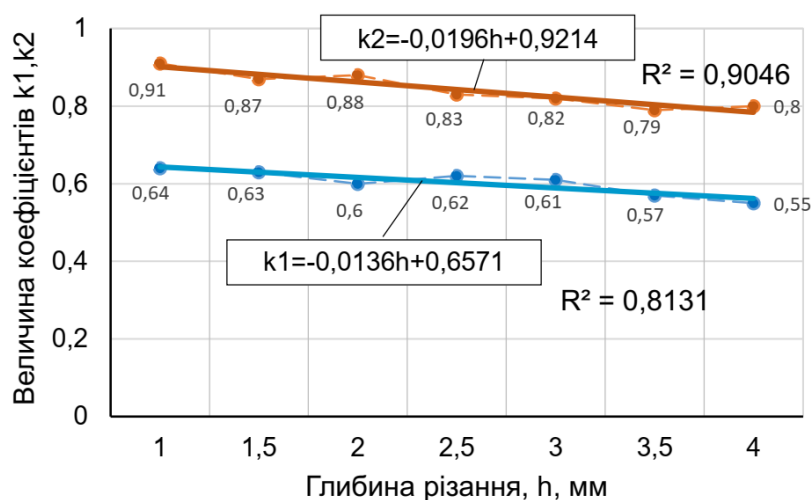


Рис. 7. Вплив глибини різання на величину коефіцієнтів ВКП, $k=f(h)$
Джерело: розроблено авторами.

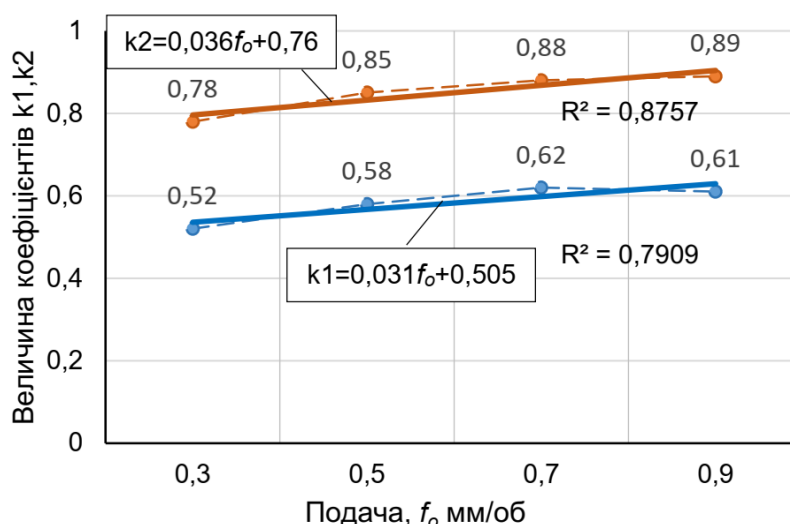


Рис. 8. Вплив подачі на величину коефіцієнтів ВКП, $k=f(f_0)$
Джерело: розроблено авторами.

Збільшення глибини різання h призводить до зменшення величини коефіцієнтів ВКП, для обох схем формування розмірів. При цьому інтенсивність зменшення, а отже, і вагомість впливу глибини різання менша, ніж вплив подачі f_0 та значно менша, ніж жорсткості C інструментальної наладки. Таким чином, вплив глибини різання в розглянутому діапазоні відображає переважно тенденцію і не є достатньо вагомим. Це свідчить про відносно невелику чутливість коефіцієнтів ВКП до зміни глибини різання, отже, і на необхідність орієнтації на величини більш значущих факторів при виборі значень коефіцієнтів k_1 і k_2 .

Величини коефіцієнтів a_i в лінійних моделях ($y_i = a_i x_i + b_i$), що відображають вплив подачі f_0 , є в середньому вдвічі більші, ніж у моделях впливу глибини різання h . Таким чином, вплив подачі f_0 більш виражений, у порівнянні з впливом глибини різання h , але також є менш вагомим, ніж вплив схеми формування розмірів і жорсткості C інструментальної наладки.

Аналіз впливу твердості заготовки виконувався в діапазоні HB 180-230 одиниць і не виявив значних змін коефіцієнтів k_1 , k_2 , що свідчить про збереження приблизно однакового рівня ефекту ВКП при зміні твердості (рис. 9). За характером і величиною він подібний до впливу глибини різання h .

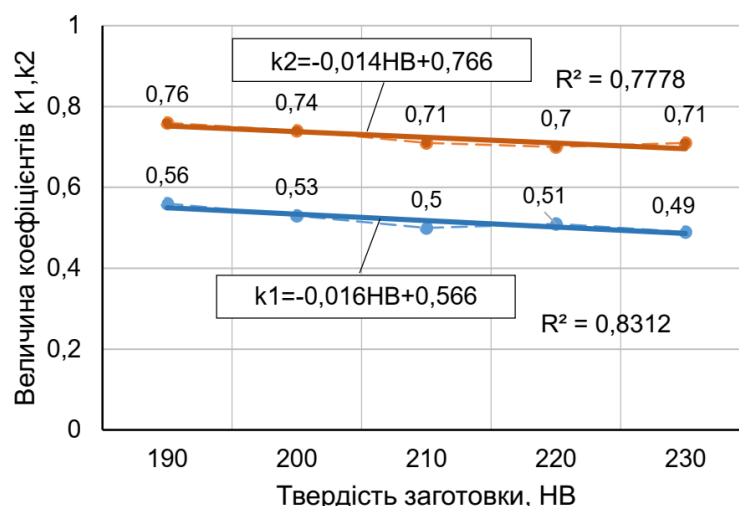


Рис. 9. Вплив твердості матеріалу заготовки (HB) на величини коефіцієнтів ВКП, $k=f(HB)$

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, отримані результати досліджень виявили тенденції впливу різних факторів, які повинні бути враховані при уточненні величини коефіцієнтів ВКП (k), на основі аналізу відповідних моделей, приведених на графіках.

У практичних розрахунках, при оцінюванні прогнозової точності доцільно використовувати узагальнені значення коефіцієнтів ВКП k . Такі оцінки для досліджених схем формування розмірів з однаковим розташуванням припусків на оброблюваних поверхнях, на основі отриманих результатів, рекомендується приймати в межах наступних значень k :

а) при формуванні розмірів одним різцем за програмою ЧПК – $k_1 = 0,5-0,65$ або усереднене значення $k_1 = 0,55$;

б) при формуванні розмірів набором інструментів – $k_2 = 0,65-0,85$ або усереднене значення $k_2 = 0,75$.

При більш детальному виборі необхідно орієнтуватись та брати до уваги рівень значень найбільш вагомих факторів, що характеризують відповідні умови оброблення.

Обговорення та аналіз результатів. Моделювання та аналіз процесів оброблення з використанням різних схем формування розмірів для визначення впливу факторів на величину коефіцієнта ВКП засвідчило значний вплив схем формування ТР, а також важливість та необхідність урахування розташування припусків відносно оброблюваних поверхонь.

При різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях (див. рис. 1) і формуванні розміру одним інструментом ВКП ТР відсутня. При формуванні розмірів набором інструментів і з різностороннім розташуванням припусків (див. рис. 2) величина ВКП мінімальна і знаходиться у межах $k = 0,05$, її можна не враховувати при розрахунках ОРЛ. При цьому, необхідно відзначити, що точність замикаючих ланок – КР буде вищою при обробленні набором інструментів, завдяки деякій стабілізації та компенсації сил різання, що діють в протилежних напрямках на обох інструментах, розташованих в інструментальному блоці, і таким чином сприяють стабілізації процесу різання навіть при деякій відмінності умов оброблення на зв'язаних розмірах поверхнях (див. рис. 3).

Отже, при різносторонньому розташуванні припусків на оброблюваних поверхнях, похибки замикаючих ланок – конструкторських розмірів будуть включати похибки обох розмірів, що входять в ОРЛ, а розрахунок ОРЛ і величин полів розсіювання замикаючих ланок – конструкторських розмірів повинні виконуватись без урахування взаємокомпенсації ТР.

При односторонньому розташуванні припусків на зв'язаних розміром поверхнях (див. рис. 2, 3), завжди буде мати місце ВКП ТР, тому величини полів розсіювання замикаючих ланок – конструкторських розмірів повинні виконуватись з урахуванням взаємокомпенсації відповідних ТР.

Комп'ютерне моделювання та аналіз процесів формування розмірів з використанням різних схем показало, що найбільший вплив на ВКП мають схеми формування розмірів. Величина коефіцієнта k буде суттєво більшою у випадку формування розміру обробленням набором інструментів, у порівнянні з обробленням одним інструментом по програмі. Така закономірність має місце при будь-яких режимах різання, характеристиках ТОС та оброблюваного матеріалу.

Вплив жорсткості C інструментальної наладки на величину k – менший ніж схеми формування, але достатньо значущий і його слід ураховувати при виборі величин k . При збільшенні величини C має місце зменшення k , це характерно для обох схем формування технологічних розмірів.

Швидкість різання, для обох схем формування розмірів, не впливає на величину k . Глибина різання h та подача f_o мають обмежений вплив, який проявляється у зміні величини k у межах до 0,1 з тенденцією до зростання при збільшенні подачі. Глибина різання h та подача f_o мають деякий сукупний вплив, рівень якого залежить від їх співвідношення. Більші величини k мають місце при сукупності невеликих глибин різання $h = 1-2$ мм і великих подач $f_o = 0,5-0,9$ мм/об.

Зміна твердості матеріалу, в межах HB (180-230) не має відчутного впливу на величину коефіцієнтів ВКП для обох схем формування розмірів.

Використання встановлених закономірностей впливу різних факторів сприятиме обґрунтованому вибору величини k залежно від умов оброблення та отриманню більш достовірних оцінок прогнозованої точності отримуваних розмірів.

Урахування ВКП також розширює можливості представлення ТР на операційних ескізах, дозволяє використання найбільш прийняттого способу – ланцюгового, координатного чи комбінованого та забезпечує отримання достовірних прогнозних оцінок точності в усіх випадках. Знання та використання параметрів ВКП ТР дозволяє обґрунтовано визначити та розширити допуски ТР, при забезпеченні заданої точності КР. При цьому розширені допуски ТР можуть перевищувати допуск замикаючої ланки. Використання механізму урахування ВКП при розмірному аналізі розкриває суть формування розмірів – замикаючих ланок та пояснює факт отримання величин допусків замикаючих ланок менших ніж допуск однієї складової ланки, а тим більше ніж сума допусків складових ланок. Така методологія врахування ВКП дозволяє також розрахувати значення допусків ТР, які, будучи більшими ніж допуск замикаючої ланки, забезпечать задану точність конструкторського розміру при меншій собівартості та більшій продуктивності оброблення.

Покажемо на прикладі (див. рис. 1, 2) ефективність та доцільність урахування ВКП ТР. Згідно зі схемою операційного розмірного ланцюга (див. рис. 1, 2) представимо його загальне рівняння та визначимо прогнозне значення $\omega A1$:

$$A1 = -F1 + F2.$$

Тоді величина поля розсіювання замикаючої ланки – конструкторського розміру, без урахування ВКП, буде дорівнювати: $\omega A1 = \omega F1 + \omega F2$.

З урахуванням похибок ТР, що взаємокомпенсуються, рівняння, у якому однією зі складових буде величина взаємокомпенсації ω_k , матиме такий вид [13]:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2\omega_k \text{ або } \omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2 \cdot k \cdot \omega F1.$$

Якщо $F1 = 50$ мм., $F2 = 100$ мм., $A1 = 50$ мм, необхідно забезпечити $\omega A1 = 0,16$ мм (IT11). Плануємо завершальне (чистове) оброблення з виконанням ТР $F1$ і $F2$ по IT10, тоді буде забезпечено [1; 2]: $\omega F1 = 0,12$ мм, $\omega F2 = 0,14$ мм.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$ без урахування ВКП буде дорівнювати:

$$\omega A1 = \omega F1 + \omega F2 = 0,12 + 0,14 = 0,26 \text{ мм.}$$

Висновок 1: задана точність КР, чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, не забезпечується, необхідно вводити додаткове (тонке) оброблення.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$, при обробленні чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, з урахування ВКП та $k1 = 0,6$, буде дорівнювати:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2k \cdot \omega F1 = 0,12 + 0,14 - 2 \cdot 0,6 \cdot 0,12 = 0,26 - 0,144 = 0,116 \text{ мм} \approx 0,12 \text{ мм.}$$

Висновок 2: Задана точність КР, чистовим точінням різцем за програмою ЧПК, при оцінці її з урахування ВКП, забезпечується і вводити додаткове (тонке) оброблення не потрібно.

Прогнозна величина поля розсіювання розміру $A1$, при обробленні чистовим точінням набором інструментів, з урахування ВКП та $k2 = 0,7$, буде дорівнювати:

$$\omega A1_k = \omega F1 + \omega F2 - 2 \cdot k \cdot \omega F1 = 0,12 + 0,14 - 2 \cdot 0,7 \cdot 0,12 = 0,26 - 0,168 = 0,092 \text{ мм} \approx 0,09 \text{ мм.}$$

Висновок 3: При обробленні чистовим точінням набором інструментів задана точність КР, забезпечується по IT10 замість IT11, у зв'язку з чим можна обмежитись одноразовим точінням.

Наведений приклад засвідчує суттєву відмінність (більше ніж удвічі) в оцінках прогнозованої точності, без та з урахування ВКП технологічних розмірів, що підтверджує необхідність та доцільність використання, отриманих при моделюванні, коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів для підвищення якості прогнозних оцінок точності конструкторських розмірів при токарному обробленні заготовок.

З метою перевірки та підтвердження результатів отриманих комп'ютерним моделюванням для токарного оброблення поверхонь набором інструментів, у цій роботі оцінювання ВКП технологічних розмірів також було виконано з використанням методики, що базується на використанні експериментально-статистичних даних [13], наведених у науковій і довідковій літературі, які характеризують точність оброблення на токарних верстатах набором інструментів. Для визначення величини взаємокомпенсації виконувався аналіз варіанта одержання конструкторського розміру $A1$ (див. рис. 2) прямим формуванням ТР, що збігається з конструкторським розміром $A1$, обробленням двох поверхонь набором інструментів. Згідно з експериментально-статистичними даними, наведеними в літературі [1; 2] прогнозна величина поля розсіювання отриманого таким способом розміру $A1$ знаходиться в межах $\omega A1 = 0,06 - 0,10$ мм. У нашому прикладі прогнозна величина, отримана розрахунком з використанням коефіцієнта ВКП, становить $\omega A1_k = 0,09$ мм, тобто попадає в інтервал $0,06 - 0,1$ мм.

Збіг результатів прогнозних оцінок точності КР, отриманих на основі використання коефіцієнтів ВКП, а також на основі експериментально-статистичних даних свідчить про достовірність результатів моделювання та підтверджує можливість ефективного й коректного використання отриманих величин коефіцієнтів ВКП при прогнозуванні точності розмірів у реальному виробництві.

Висновки. 1. Теоретичний аналіз та результати комп'ютерного моделювання засвідчили значний вплив схем формування розмірів на величину взаємокомпенсації похибок ТР, а отже, і на точність отримуваних розмірів, що підтверджує важливість та необхідність урахування такого впливу при прогнозуванні точності розмірів.

2. На основі результатів досліджень встановлені графічні залежності та математичні моделі, що відображають вплив на величину взаємокомпенсації похибок умов оброблення, які необхідні для визначення величин коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів при використанні різних схем формування розмірів.

3. Встановлено, що величини взаємокомпенсації та відповідних коефіцієнтів k будуть суттєво більшими у випадку формування розмірів при обробленні набором інструментів, у порівнянні з обробленням одним інструментом по програмі. Така закономірність має місце при будь-якому рівні режимів різання, характеристик ТОС та оброблюваного матеріалу і свідчить про можливість забезпечення вищої точності.

4. Порівняння отриманих комп'ютерним моделюванням значень коефіцієнтів k з відповідними величинами, які були отримані в роботі з використанням інших методів засвідчило їх збіг, чим була підтверджена достовірність результатів моделювання.

5. Для практичного використання при прогнозуванні точності отримуваних розмірів доцільно рекомендувати такі рівні коефіцієнтів ВКП (k): а) при формуванні розміру обробленням одним різцем – $k_1 = 0,5-0,65$; б) для умов формування розмірів набором інструментів – $k_2 = 0,65-0,85$. Більш точні значення коефіцієнтів, при необхідності, можна отримати на основі врахування умов оброблення з використанням відповідних моделей.

6. Використання рекомендованих величин коефіцієнтів взаємокомпенсації похибок технологічних розмірів дозволяє істотно підвищити якість прогнозової оцінки точності замикаючих ланок – конструкторських розмірів за рахунок суттєвого наближення їх до реальних значень, які дають оцінки, що будуть більше ніж удвічі меншими від оцінок, отриманих без урахування взаємокомпенсації похибок. Підвищення точності прогнозування дозволяє більш обґрунтовано підійти до формування структури ТП, яка забезпечить підвищення продуктивності та скорочення витрат на оброблення при забезпеченні заданої точності розмірів та дозволить уникнути додаткового коригування ТП у процесі його впровадження.

Список використаних джерел

1. Рудь, В. Д., Герасимчук, О., & Маркова, Т. (2010). *Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій*. РВВ ЛДТУ.
2. Приходько, В. П. (2021). *Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка»*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>.
3. Бондаренко, С. Г. (1993). *Розмірні розрахунки механоскладального виробництва*. ІСДО.
4. Кравченко, Л. С. (2009). *Розмірний аналіз при проектуванні, виготовленні й складанні*. НТУ "ХПІ".
5. Dietrich, R., Garsaud, D. Gentillon, S., & Nicolas, M. (2004). *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. Ed. NATHAN – AFNOR
6. Mercier, J (2007). *De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage, 3ème édition*. Edition de la Technique moderne - Pierron, Sarguemines.
7. Приходько, В., Пуховський, Є., Данилова, Л., Лапковський, С., & Сапон, С. (2022). Інформаційне забезпечення розмірного моделювання та аналізу технологічних процесів. *Технічні науки та технології*, (3(29)), 77–93. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3\(29\)-77-93](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-3(29)-77-93).
8. Tichadou, S. (2004). *Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage*.
9. Bourdet, P. *Chaine de cotes unidirectionnelle (modèle et mode opératoire)*. École normale supérieure de Cachan. 94235.
10. Marche, L., Paquet G. (2004). *Guide de la productique*. Ed. Delagrave, Paris.
11. Branger, G. (2008). *Guide du bureau des méthodes*. Ed. Desforges. Paris.
12. Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Elsevier Science & Technology Books.

13. Приходько, В. П., Пуховський, Є. С., Данилова, Л. М., Лапковський, С. В., & Гаврушкевич, Н. В. (2023). Визначення та урахування величини взаємокомпенсації похибок при прогнозуванні точності оброблення на верстатах з ЧПК. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4(50)), 84–91. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.12>.

14. Wolff, V., & Lefèbvre, A. (2007). *Vers l'évaluation des dispersions d'usinage en tournage pour la caractérisation d'une MOCN*. <https://hal.science/hal-00344394v1/document>.

15. Kamali Nejad, M., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2009). Simulation of the geometrical defects of manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), 631–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2001-3>.

16. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Доброскок, В. Л., Залога, В. О., Новосьолов, Ю. К., & Якубов, Ф. Я. (2000, 2011). *Основи теорії різання матеріалів*. Новий світ.

References

1. Rud, V. D., Herasymchuk, O. O., & Markova, T. P. (2008). *Rozmirno-tochnistnyi analiz konstruksii ta tekhnolohii [Dimensional-accuracy analysis of constructions and technologies]*. RVV LDTU.

2. Prykhodko, V. P. (2021). Rozmirne modeliuвання ta analiz tekhnolohichnykh protsesiv: navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 «Prykladna mekhanika» [Dimensional modeling and analysis of technological processes: study guide for students of specialty 131 “Applied mechanics”]. *KPI im. I. Sikorskoho – Kyiv Polytechnic Institute named after I. Sikorsky*. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>.

3. Bondarenko, S. H. (1993). *Rozmirni rozrakhunky mekhanoskladalnoho vyrobnytstva [Dimensional accounts of mechano-assembly production]*. Instytut systemnykh doslidzhen osvity Ukrainy.

4. Kravchenko, L. S. (2009). Razmernyi analiz pry proektyrovanny, yzgotovlenyy y sborke [Dimensional analysis in design, manufacture and assembly]. *NTU “KhPI” – National Technical University “Charkiv Polytechnic Institute”*.

5. Dietrich, R., Garsaud, D. Gentillon, S., Nicolas, M. (2004). *Précis de méthodes d'usinage : méthodologie, production et normalisation*. 7ème édition", Ed. NATHAN - AFNOR.

6. Mercier, J (2007). De l'étude de fabrication à l'analyse d'usinage. 3ème édition. Edition de la Technique moderne - Pierron, Sarguemines.

7. Prykhodko, V., Pukhovskiy, Y., Danylova, L., Lapkovskiy, S., Sapon, S. (2022). Informatsiine zabezpechennia rozmirnoho modeliuвання ta analizu tekhnolohichnykh protsesiv. [Information support for dimensional modeling and analysis of technological processes]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (3(29)), 77-93.

8. Tichadou, S. (2004). Modélisation et quantification tridimensionnelles des écarts de fabrication pour la simulation d'usinage.

9. Bourdet, P. *Chaine de cotes unidirectionnelle (modèle et mode opératoire)*. École normale supérieure de Cachan. 94235.

10. Marche, L., Paquet G. (2004). *Guide de la productique*. Ed. Delagrave, Paris.

11. Branger, G. (2008). *Guide du bureau des méthodes*. Ed. Desforges. Paris.

12. Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook*. Elsevier Science & Technology Books.

13. Prykhodko, V. P., Pukhovskiy, Y. S., Danylova, L. M., Lapkovskiy, S. V., & Havrushkevych, N. V. (2022). Vyznachennya ta urakhuvannya velychyny vzayemokompensatsiyi pokhybok pry prohozuvanni tochnosti obroblennya na verstatakh z CHPK. [Determination and accounting of the value of mutual compensation of errors in predicting the accuracy of processing on CNC-machines]. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (4(50)), 78-85.

14. Wolff, V., & Lefèbvre, A. (2007). *Vers l'évaluation des dispersions d'usinage en tournage pour la caractérisation d'une MOCN*. <https://hal.science/hal-00344394v1/document>.

15. Kamali Nejad, M., Vignat, F., & Villeneuve, F. (2009). Simulation of the geometrical defects of manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(7-8), 631–648. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2001-3>.

16. Mazur, M. P., Vnukov, Yu. M., Dobrosiuk, V. L., Zaloha, V. O., Novosolov, Yu. K., & Yakubov, F. Ya. (2000, 2011). *Osnovy teorii rizannia materialiv*. [Fundamentals of the cutting theory of materials] *Novyy Svit – New World*.

Отримано 16.06.2025

UDC 621.757:621.793

**Vasyl Prykhodko¹, Liudmyla Danylova², Serhii Lapkovsky³,
Serhii Sapon⁴, Volodymyr Frolov⁵, Oleksandr Kravets⁶**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: privas0718@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. **Researcher ID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/HDM-7277-2022)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: ldanylova@outlook.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **Researcher ID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/ADU-9265-2022)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **Researcher ID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/HCH-3837-2022)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: s.sapon@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. **Researcher ID:** [IZE-2184-2023](https://orcid.org/IZE-2184-2023)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **Researcher ID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/ACH-0071-2022)

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of machine design
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: om.kravets@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **Researcher ID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/IUQ-7186-2023)

AUTOMATED ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL DIMENSIONING SCHEMES ON THEIR ACCURACY

The study determined the influence of various factors and processing conditions on the value of the mutual error compensation coefficient of technological dimensions during turning. To investigate the impact of mutual error compensation on the accuracy of the resulting dimensions, the analysis of their formation schemes during machining on CNC machines was performed. Automated evaluation of the influence of technological dimension formation schemes on their accuracy using computer simulation was carried out.

Conditions and methodology for computer simulation of machining processes were formulated. Algorithms and the specialized program for simulating the dispersion of technological dimension values were developed. Simulation in the program allowed determining the effect of mutual error compensation of technological dimensions on their accuracy for different machining schemes. To ensure reliable results, simulation was repeated three times for each processing condition. Based on the obtained data, average values of mutual error compensation coefficients for different machining schemes and conditions were calculated. Graphical and analytical dependencies were constructed, reflecting the influence of the machining scheme, cutting conditions, and work-piece material hardness on the mutual error compensation coefficients. The obtained compensation coefficient values and their determination dependencies are necessary for consideration when assessing accuracy of technological dimensions.

It was found that mutual compensation values and corresponding coefficients are significantly higher when machining with a set of tools compared to machining with a single tool under CNC programming.

Examples of calculating the accuracy of the closing link in the operational dimensional chain are provided. It is shown that using the recommended mutual error compensation coefficients for technological dimensions significantly improves predictive assessment quality of closing links—design dimensions—by bringing them much closer to real values. Predictive accuracy, when accounting for mutual error compensation coefficients, is more than twice as high as in calculations without considering error compensation.

The improved prediction accuracy offered by the methodology presented in this work allows for the more substantiated approach to structuring technological processes. This ensures increased productivity and reduced machining costs while achieving the required dimensional accuracy.

Keywords: dimensional analysis; dimensional accuracy assessment; mutual compensation of dimensional errors, machining accuracy.

Fig.: 9. References: 16.

Валерій Іванович Солодкий

кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)

E-mail: solodkiyv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2595-5436>, ResearcherID: [MZQ-5574-2025](https://orcid.org/MZQ-5574-2025)**ТРИАНГУЛЯЦІЯ ГВИНТОВИХ ПОВЕРХОНЬ
У ПРОЦЕСАХ ФОРМОУТВОРЕННЯ**

На основі диференціальної теорії поверхонь представлено метод триангуляції гвинтових поверхонь просторовими елементами циліндричної форми у процесах формоутворення. Використання просторових елементів замість традиційних плоских типу трикутника або багатогранника дозволяє безперервно визначати диференціальні характеристики локальної геометрії триангульованої фасонної гвинтової поверхні. Наведено математичні залежності визначення параметрів кривини, кручення, положення площини дотичної до фасонної поверхні деталі та напрямку нормалі необхідних для проектування інструменту утворюючого фасонні гвинтові поверхні.

Ключові слова: триангуляція; гвинтові поверхні; формоутворення.

Рис.: 4. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. У тривимірному просторі триангуляцію поверхні можна інтерпретувати, як заміну відомої фасонної поверхні сукупністю елементарних геометричних фігур – кінцевих триангуляційних елементів.

Триангуляцію складних фасонних поверхонь широко використовують, як складову частину методу кінцевих елементів при дослідженні напруженого стану окремих частин різального інструменту або пошуку спряжених поверхонь при вирішенні задач профілювання, зокрема пошуку початкової інструментальної поверхні та визначення форми фасонних різальних інструментів.

У виробничих процесах триангуляцію поверхонь застосовують під час формоутворення деталей на верстатах із числовим програмним керуванням.

Постановка проблеми. Основною проблемою при розв'язанні задач формоутворення та обробки фасонних поверхонь із застосуванням триангуляції є проблема адекватного відображення локальних диференціальних характеристик поверхні, а саме: положення площини дотичної до поверхні деталі, напрямку нормалі, кривина, кручення. Ці параметри необхідні для визначення профілю різальних кромок інструмента та оптимізації траєкторій його руху.

Для поверхні не підданої триангуляції ці параметри змінюються плавно і безперервно у всьому досліджуваному просторі. Водночас триангульована поверхня, що представлена сукупністю плоских триангуляційних елементів, має лише дискретні значення вказаних параметрів локальної геометрії поверхні, однакових для всього триангуляційного елемента.

Це вносить значні похибки у результати дослідження умов формоутворення. Крім того, такі поняття, як кривина та кручення щодо плоского елемента не зовсім коректні.

Теоретично вказану проблему можна вирішити, збільшивши кількість елементів, на які розбита триангульована поверхня. Проте розбивка поверхні на велику кількість елементів значно ускладнює розрахунки і зводить нанівець практичні переваги триангуляції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Триангуляцію, як складову частину методу кінцевих елементів, широко застосовують при вирішенні задач опору матеріалів і теорії пружності оболонок [1; 2].

Одночасно, триангуляцію поверхонь та метод кінцевих елементів, які добре розроблені в механіці стрижневих систем стосовно розрахунку навантажень і деформацій складних просторових деталей [3; 4], використовують при проектуванні сучасного збірного різального інструменту. У цьому випадку об'ємну поверхню деталі представляють суку-

пністю плоских елементарних геометричних фігур, зазвичай трикутників або паралелограмів [5; 6; 7]. Таке представлення поверхні спрощує задачі пошуку спряжених поверхонь при конструюванні різальних інструментів.

Виділення недослідженої частини загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що у більшості випадків триангуляція фасонної поверхні здійснюється простими плоскими фігурами, здебільшого трикутниками або паралелограмами.

Разом з тим недостатньо розроблені методи триангуляції складних фасонних поверхонь об'ємними елементами, які мають безперервні диференціальні характеристики досліджуваної поверхні.

Метою статті є розробка методу триангуляції гвинтової поверхні за допомогою гвинтових траєкторій, що дає можливість перейти від дискретного представлення диференціальних характеристик гвинтової поверхні до безперервного та сформулювати математичні залежності, які безперервно описують характеристики поверхні у локальному просторі її існування.

Виклад основного матеріалу. Мінімальним геометричним елементом, сукупністю яких може бути задана поверхня довільної форми є точка. Однак такі поняття як нормаль, кривина й дотична, які характеризують локальну геометрію поверхні, не можуть бути застосовні до точки.

Одним зі способів, який дозволяє перейти від дискретного представлення параметрів локальної геометрії триангульованої поверхні до безперервного, може бути використання поняття гвинтові траєкторії, як межі триангуляційних елементів.

Гвинтову поверхню можна розглядати, як сукупність гвинтових траєкторій точок, які належать її довільному перерізу. У цьому випадку, використовуючи гвинтові траєкторії, як межі триангуляційних елементів, можна перейти від дискретних значень локальних диференціальних характеристик поверхні до безперервних уздовж кордонів цих елементів. Одночасно це дозволяє використовувати замість плоского кінцевого елемента частину циліндричної поверхні постійного радіуса, який має велику гомеоморфність щодо гвинтової поверхні.

Отже, поверхню можна представити, як сукупність нескінченної кількості ліній не ідентичних одна одній. Проте більш доцільним є утворення регулярної сукупності ліній, які мають однакові геометричні ознаки. У такому разі гвинтову поверхню доцільно розглядати, як сукупність гвинтових траєкторій точок, що мають гвинтовий рух вздовж осі гвинтової поверхні.

Не дивлячись те, що кожна з цих сукупностей утворена різними за формою лініями, всередині кожної сукупності вони підпорядковані загальним умовам. Важливим є те, що ці лінії можна розглядати, як траєкторії точок, які рухаються у просторі за законом єдиним для всіх точок. Це дозволяє описати одним математичним законом (математичною залежністю) всю фасонну гвинтову поверхню.

З погляду формоутворення поверхонь доцільно використовувати такі траєкторії, які певною мірою характеризують форму всієї поверхні й водночас є досить простими кривими. Щодо гвинтових поверхонь, такими траєкторіями можуть бути гвинтові траєкторії точок, що належать її торцевому перерізу. Вибір гвинтових траєкторій має кілька переваг перед лініями іншого типу. Розглянемо їх докладніше.

З погляду процесу формоутворення гвинтової поверхні на верстаті, гвинтова траєкторія має ту перевагу, що майже завжди збігається з рухом інструменту відносно деталі, а її форма досить повно відображає основні характеристики гвинтової поверхні. Зокрема, її крок, напрям дотичної, кут нахилу твірної, гвинтовий параметр поверхні.

Не менш важливі властивості гвинтові траєкторії мають і з погляду теорії поверхонь, адже вони є геодезичними лініями, які мають кілька особливих властивостей, а саме є найкоротшими, фронтальними і найбільш прямими [8; 9].

Властивість геодезичної лінії, як найкоротшої полягає в тому, що всяка дуга геодезичної лінії є найкоротшою лінією на поверхні між двома довільними точками. З погляду технології обробки деталі на верстаті, властивість геодезичної лінії, як найкоротшої відповідає найкоротшій траєкторії інструменту при якій можливе формоутворення гвинтової поверхні деталі. Це забезпечує найбільшу продуктивність обробки, особливо у разі коли рух інструменту щодо деталі є гвинтовим.

Властивість геодезичної лінії, як фронтальної полягає в тому, що дотична до неї завжди збігається з напрямком ковзання поверхні самої по собі. З технологічного т погляду ця властивість геодезичної лінії (гвинтової траєкторії) дозволяє утворювати гвинтові поверхні шляхом видавлювання.

З погляду теорії профілювання властивість геодезичної лінії, як лінії ковзання, дозволяє використовувати поняття про “ковзання поверхні самої по собі” введене професором П. Р. Родіним [10] у теорію профілювання інструменту в середині минулого століття, що значно спрощує процес пошуку початкової інструментальної поверхні.

Властивість геодезичної лінії, як найбільш прямої полягає в тому, що нормаль до поверхні збігається з дотичною площиною геодезичної лінії. З погляду теорії формоутворення, це дозволяє досить просто визначити такі геометричні параметри гвинтової поверхні як дотична, нормаль, кривина, які є основними параметрами при дослідженні характеру дотику спряжених поверхонь інструмента та деталі.

На рис. 1, *a* зображена гвинтова поверхня, яка тріангульована плоскими трикутниками за традиційною методикою, і та сама поверхня, тріангульована сукупністю гвинтових траєкторій T_1 , T_2 і T_3 (рис. 1, *б*).

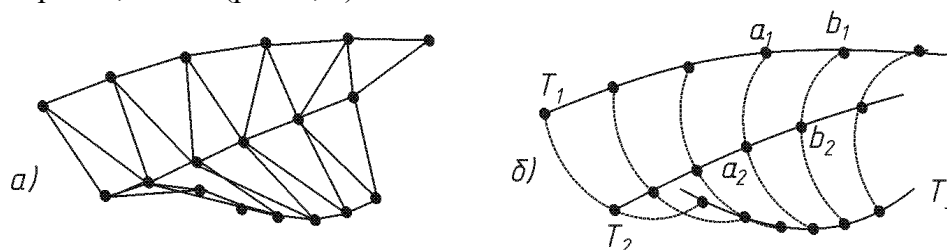


Рис. 1. Тріангуляція гвинтової поверхні

Джерело: розроблено автором.

В обох випадках тріангуляція поверхні була здійснена за одними і тими ж реперними точками. Якщо у разі застосування традиційної методики тріангуляції елементарний елемент має форму площинного трикутника, то при застосуванні тріангуляції гвинтовими траєкторіями він має форму тривимірного об'ємного чотирикутника $a_1b_1a_2b_2$, що більш точно відображає просторову гвинтову поверхню.

При цьому сторони a_1b_1 та a_2b_2 є гвинтовими траєкторіями, а сторони a_1a_2 та b_1b_2 є частинами торцевого перерізу гвинтової поверхні, який може бути представлений дугою кола. Слід зазначити, що при тріангуляції трикутними елементами визначити напрямок дотичної до поверхні в реперній точці досить складно, оскільки жодна з меж трикутника не збігається з гвинтовою поверхнею.

Водночас при тріангуляції поверхні гвинтовими траєкторіями напрямок дотичних уздовж двох протилежних меж a_1a_2 та b_1b_2 тріангуляційного елемента можливо визначити не тільки наближено, а й теоретично точно, що дозволяє здійснити дослідження умов формоутворення з мінімальною похибкою.

Раніше було зазначено, що як початкове положення точок сукупності гвинтових траєкторій, доцільно приймати точки торцевого перерізу досліджуваної поверхні, який можна замінити дугами кола..

Це дозволяє описати торцевий профіль гвинтової поверхні простішими функціональними залежностями і, що більш важливе, визначити диференціальні характеристики локальної ділянки гвинтової поверхні після її триангуляції гвинтовими траєкторіями.

Знаючи рівняння гвинтової траєкторії та параметри кола, що проходить через точки торцевого перерізу гвинтової поверхні, можна визначити напрямки нормалі та положення площини дотичної до поверхні, величини головних кривин та нормальної кривини, а також ряд інших параметрів.

Нехай торцевий переріз гвинтової поверхні представлено сукупністю точок M_i з координатами x_i та y_i при $i = 1 \dots n$. Якщо здійснити заміну всіх n точок торцевого профілю дугою кола, то координати x_c і y_c центру O_c кола та його радіус R можна знайти із системи рівнянь:

$$\begin{cases} (x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 = R^2, \\ (x_q - x_c)^2 + (y_q - y_c)^2 = R^2, \\ (x_s - x_c)^2 + (y_s - y_c)^2 = R^2, \end{cases}$$

де p, q і s – номери довільних розрахункових точок.

Стохастично надаючи параметрам p, q і s довільні значення в межах від 1 до n , і довільно групуючи трійки рівнянь наведених вище, можна визначити значення параметрів R, x_c та y_c для кожної трійки рівнянь. Тоді за остаточний результат приймають їхні середні арифметичні значення.

Як альтернативний спосіб визначення параметрів R, x_c та y_c можливо використовувати метод найменших квадратів, розв'язавши систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum \frac{\left(\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2} + R\right)(2x_c - 2x_i)}{\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2}} &= 0, \\ \sum \frac{\left(\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2} + R\right)(2y_c - 2y_i)}{\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2}} &= 0, \\ \sum \left(2R - 2\sqrt{(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2}\right) &= 0. \end{aligned}$$

Недоліком способу заміни всіх n точок профілю одним колом є те, що отримане коло не проходить через жодну з реперних точок. Проблема можна уникнути замінюючи профіль дугами, які проходять через групи з трьох реперних точок.

Таким чином, групуючи всі точки профілю по три у групі, можливо послідовно описати дугами весь торцевий профіль гвинтової поверхні. Проте в такому разі виникають щонайменше дві проблеми.

По-перше, знайдені кола не враховують характер розташування сусідніх точок профілю.

По-друге, параметри кола залежать від напрямку їхнього групування. Так, для двох точок M_2 та M_3 за рис. 2 маємо два різних кола $R_{(1,2,3)}$ і $R_{(2,3,4)}$ залежно від того, з якого боку групують реперні точки.

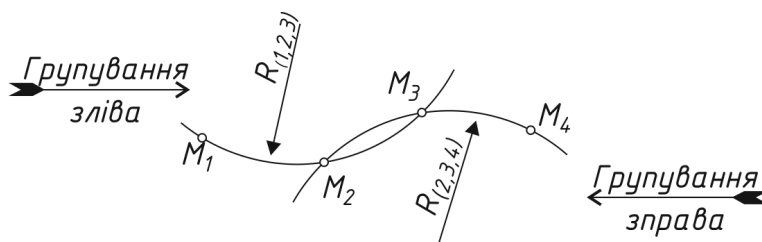


Рис. 2. Орієнтація кола залежно від напрямку групування реперних точок
Джерело: розроблено автором

Розглянута методика дозволяє замінити складний криволінійний профіль торцевого перерізу гвинтової поверхні сукупністю дуг, які проходять через реперні точки з допустимим відхиленням і враховують характер розташування сусідніх реперних точок.

На рис. 3, а зображена частина гвинтової поверхні, яка була триангульована за допомогою двох гвинтових траєкторій T_1 та T_2 , а на рис. 3, б елементарний триангуляційний чотирикутник $a_1b_1a_2b_2$, що обмежений двома гвинтовими траєкторіями T_1 та T_2 та двома дугами радіуса R .

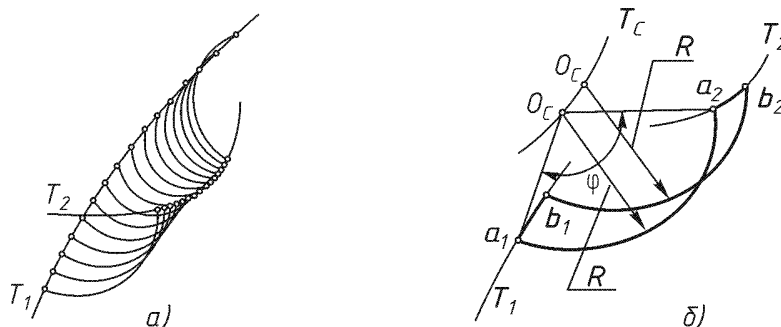


Рис. 3. Елементи триангуляції:

а – схема триангуляції гвинтовими траєкторіями; б – триангуляційний елемент
Джерело: розроблено автором.

Необхідно відзначити, що центр O_c кола радіуса R рухається в просторі також по гвинтовій траєкторії T_c з гвинтовим параметром гвинтової поверхні.

Слід зазначити, що у випадку традиційної триангуляції трикутниками для представлення всієї гвинтової поверхні необхідно зберігати інформацію про всі реперні точки розташовані на початковій гвинтовій поверхні, що вимагає значних інформаційних затрат.

Одночасно при триангуляції гвинтовими траєкторіями достатньо зберігати інформацію тільки про радіус R , величину кута φ , що обмежує дугу кола і гвинтову траєкторію T_c .

Вся інша інформація щодо триангуляції гвинтової поверхні може бути отримана на підставі розрахунків однакових для будь-якої її ділянки.

Триангуляція гвинтової поверхні за допомогою сукупності гвинтових траєкторій дозволяє розглянути питання про достовірність подання триангульованої поверхні. Можна стверджувати, що чим ближче одна до одної розташовані утворюючи траєкторії, тим більше достовірно представлена поверхня.

У той же час при тій самій відстані між сусідніми траєкторіями, достовірність представлення поверхні залежить від її форми. У зв'язку з цим доцільно ввести поняття про критерій достовірності представлення поверхні. Можливі кілька варіантів формулювання критерію достовірності подання поверхні.

Достовірність представлення поверхні за довжиною. Критерій достовірності $\aleph$ за довжиною подання триангульованої поверхні, це відношення довжини l_T прямої лінії, яка з'єднує дві точки на сусідніх траєкторіях T_1 і T_2 , до довжини l_N найкоротшої лінії, що належить до номінальної поверхні між цими точками (рис. 4, а).

Отже, математично критерій достовірності $\aleph$ подання тріангульованої поверхні можна записати як $\aleph = \frac{l_T}{l_N}$. Такий критерій зручний тим, що у разі повного збігу номінальної поверхні та поверхні представленої дискретною кількістю траєкторій, чисельне значення критерію достовірності дорівнюватиме одиниці $\aleph = 1$, а за наявності відхилення (зазору) між номінальною та тріангульованою поверхнями, його значення буде менше одиниці.

Як площину, у якій лежать відрізки l_T і l_N , можна використовувати площину торцевого перерізу гвинтової поверхні, або нормальну площину до однієї з гвинтових траєкторій. Це дозволяє говорити про нормальний і торцевий критерії достовірності представлення гвинтової поверхні.

Достовірність представлення поверхні за відстанню. Як інший варіант критерію достовірності $\aleph_h$ можна використовувати величину відношення найбільшої відстані h між номінальною та тріангульованою поверхнями до відстані l_T між гвинтовими траєкторіями, що представляють гвинтову поверхню (рис. 4, б), що математично можна записати як $\aleph_h = h/l_T$.

Таке визначення критерію достовірності має ту перевагу, яка дозволяє вимірювати значення параметрів, що входять до нього безпосередньо на деталях. Однак його чисельне уявлення не зовсім коректне, оскільки у разі повного збігу поверхонь величина критерію виявляється рівною нулю, тобто $\aleph_h = 0$, що не дуже зручно.

Іншим варіантом критерію $\aleph_h$ може бути відношення l_T до h , тобто $\aleph_h = l_T/h$. Однак у такому випадку у разі повного збігу номінальної та тріангульованої поверхні (тобто у випадку $h = 0$) критерій достовірності буде дорівнювати нескінченності. Що також не дуже коректно.

Достовірність представлення поверхні за площею. Ще одним варіантом критерію достовірності подання поверхні може бути інтегральний показник площі F обмежений кривими номінальної l_N та тріангульованої l_T поверхонь у деякому перерізі (рис. 4, в). Проте, у цьому разі результат залежить від прийнятого масштабу лінійних вимірів, що призводить до неоднозначності чисельного представлення критерію.

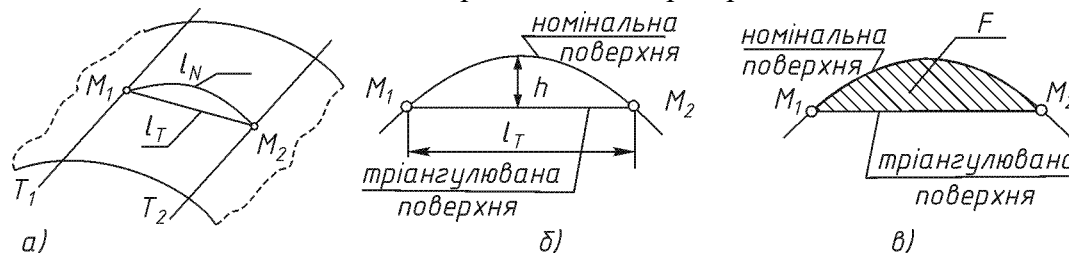


Рис. 4. Достовірність представлення поверхні:

а – достовірність за довжиною;

б – достовірність за відстанню; в – достовірність за площею

Джерело: розроблено автором

Таким чином, найбільш доцільною формою критерію достовірності подання гвинтової поверхні, яка була тріангульована за допомогою гвинтових траєкторій, є відношення довжини прямої l_T найкоротшої відстані між точками M_1 та M_2 , що належать сусіднім твірним траєкторіям T_1 і T_2 до довжини лінії l_N , що належить до номінальної поверхні розташованої між цими точками.

Розглянемо способи визначення диференціальних характеристик гвинтової поверхні тріангульованої за допомогою гвинтових траєкторій. З гвинтовою поверхнею зв'яжемо систему координат $\{XYZ\}$, що орієнтована у такий спосіб. Вісь Z збігається з віссю гвинтової поверхні, а координатна площина (XY) збігається з її торцевим перерізом точки якого визначені полярним радіус-вектором ρ та полярним кутом δ .

Рівняння гвинтової траєкторії T довільної точки M , що належить до торцевого перерізу гвинтової поверхні, можна подати у векторній формі радіусом-вектором $\mathbf{r}$ величина якого залежить від кута t повороту точки M навколо осі Z .

У цьому випадку параметр t , це кут на який повернулась точка M навколо осі гвинтової поверхні під час руху по гвинтовій траєкторії, тобто вздовж осі гвинтової поверхні

$$\mathbf{r} = [\rho \cos(\delta + t) \quad \rho \sin(\delta + t) \quad pt]^T,$$

де t – змінний параметр, чисельна величина якого дорівнює куту повороту точки M навколо осі Z ;

ρ – полярний радіус-вектор точки M у торцевому перерізі гвинтової поверхні;

δ – полярний кут точки M у торцевому перерізі гвинтової поверхні;

p – гвинтовий параметр гвинтової поверхні $p = H/2\pi$, де параметр H – крок гвинтової траєкторії (поверхні).

Тоді вектор $\mathbf{k}_R$ дотичний до гвинтової траєкторії можна визначити як

$$\mathbf{k}_R = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = [-\rho \sin(\delta + t) \quad \rho \cos(\delta + t) \quad p]^T.$$

Знаючи параметри R , x_c і y_c кола, що описує торцевий профіль можливо визначити вектор $\mathbf{k}_T$ дотичний до профілю гвинтової поверхні у її торцевому перерізі

$$\mathbf{k}_T = [\cos \xi \quad \sin \xi \quad 0]^T.$$

У наведеному виразі параметр ξ це кут між додатним напрямом осі X і напрямом дотичної $\mathbf{k}_T$ до профілю поверхні в її торцевому перерізі.

Положення двох векторів $\mathbf{k}_R$ і $\mathbf{k}_T$ дотичних до поверхні однозначно визначає положення площини дотичної до гвинтової поверхні і нормаль $\mathbf{n}$ до неї, яку можна знайти, як векторний добуток $\mathbf{n} = \mathbf{k}_R \times \mathbf{k}_T$ або у розгорнутому виді

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} -\rho \sin(\delta + t) \\ \rho \cos(\delta + t) \\ p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \xi \\ \sin \xi \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p \sin \xi \\ p \cos \xi \\ -p \cos(t + \delta + \xi) \end{bmatrix}.$$

Слід вказати, що вектор $\mathbf{k}_R$ описує дотичну до безперервної траєкторії T , а вектор $\mathbf{k}_T$ дотичну до кола між двома реперними точками і тому обидва вектори $\mathbf{k}_R$ і $\mathbf{k}_T$ є безперервними параметрами.

Отже, триангуляція гвинтової поверхні з використанням гвинтових траєкторій дозволяє отримати безперервні характеристики положення дотичної площини й нормалі до гвинтової поверхні, у всій області її існування, яке не можливо при традиційних способах триангуляції площинними кінцевими елементами.

Значною перевагою триангуляції гвинтовими траєкторіями є те, що у більшості випадків формування гвинтової поверхні, гвинтові траєкторії збігаються з напрямком руху інструменту щодо заготовки.

Визначимо диференціальні геометричні характеристики гвинтової поверхні. Приймаючи за додатний напрямок гвинтової траєкторії напрямок, який збігається з рухом точки M при зростанні параметра t , можна визначити диференціал дуги ds як

$$ds = |d\mathbf{r}| = \sqrt{\left(\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right)^2} = \sqrt{\rho^2 + p^2} dt.$$

Тоді орт $\boldsymbol{\tau}$ дотичної до гвинтової траєкторії можна визначити як

$$\boldsymbol{\tau} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{[-\rho \sin(\delta + t) \quad \rho \cos(\delta + t) \quad p]^T}{\sqrt{\rho^2 + p^2}}.$$

Чисельне значення кривини K гвинтової траєкторії в розрахунковій точці M можна визначити як

$$K = \left| \frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds} \right| = \frac{\rho}{\rho^2 + p^2},$$

$$d\boldsymbol{\tau} = \frac{[-\rho \sin(\delta + t) \quad \rho \cos(\delta + t) \quad p]^T}{\sqrt{\rho^2 + p^2}} dt.$$

Звідки можна визначити орт $\mathbf{v}$ головної нормалі

$$\mathbf{v} = \frac{1}{K} \cdot \frac{d\boldsymbol{\tau}}{ds} = [-\cos(\delta + t) \quad -\sin(\delta + t) \quad 0]^T.$$

Знаючи вирази для ортів дотичної $\boldsymbol{\tau}$ та головної нормалі $\mathbf{v}$ можна визначити напрямок орта бінормалі $\boldsymbol{\beta}$

$$\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\tau} \times \mathbf{v} = \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + p^2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -\rho \sin(\delta + t) & \rho \cos(\delta + t) & p \\ -\cos(\delta + t) & -\sin(\delta + t) & 0 \end{bmatrix}.$$

Величину кручення T можна визначити через орт головної нормалі $\mathbf{v}$ та орт бінормалі $\boldsymbol{\beta}$ як

$$T = -\mathbf{v} \cdot \frac{d\boldsymbol{\beta}}{ds} = \frac{p \cos^2(\delta + t) + p \sin^3(\delta + t)}{\rho^2 + p^2}.$$

Отже, в кожній точці що належить межі триангуляційного елемента, можливо безперервно і теоретично точно визначити основні диференціальні геометричні параметри гвинтової поверхні, що своєю чергою дозволяє виконати теоретично коректне дослідження формування гвинтової поверхні.

Таким чином, при використанні гвинтових траєкторій з одночасною заміною криволінійного торцевого профілю дугами кола, чисельне значення цих параметрів буде безперервно і плавно змінюватися вздовж кожної з чотирьох меж (кордонів) триангуляційного елемента.

Водночас при триангуляції плоскими елементами, параметри локальної геометрії триангульованої поверхні стрибкоподібно змінюють свої значення від елемента до елемента.

Практичне використання результатів. Отримані результати можуть бути використані при пошуку початкової інструментальної поверхні фасонного інструменту, який застосовують у виробничих процесах машинобудування.

Знаючи параметри початкової інструментальної поверхні можна теоретично точно визначити профіль фасонних різальних кромek інструмента та знайти їх оптимальні параметри, що підвищить загальну продуктивність обробки гвинтових деталей.

Найбільш доцільним є використання запропонованої методики при проектуванні інструменту за кінематичним методом [10; 11], який оперує з визначеними вище диференціальними параметрами гвинтової поверхні й на теперішній час є найбільш ефективним та теоретично обґрунтованим.

Висновки. У роботі вперше запропоновано метод триангуляції гвинтової поверхні сукупністю гвинтових траєкторій, що дозволяє перейти від дискретного визначення диференціальних характеристик локальної геометрії триангульованої поверхні, до безперервного. Це дає можливість теоретично точно визначати положення нормалей і дотичних у будь-якій точці на межі сусідніх триангуляційних елементів.

Представлення гвинтової поверхні сукупністю гвинтових траєкторій, з одночасною інтерполяцією профілю торцевого перерізу гвинтової поверхні частиною дуги кола, дозволяє визначати диференціальні характеристики гвинтової поверхні для будь-якої точки триангуляційного елемента. У той час як при триангуляції плоскими елементами, ці характеристики є постійними в межах одного елемента, що не відповідає дійсності.

При використанні триангуляції гвинтової поверхні сукупністю гвинтових траєкторій і дуг кола достатньо зберігати інформацію тільки про торцевий переріз поверхні і один пласт триангуляційних елементів. Повне уявлення всієї поверхні та її диференціальні характеристики, у будь-якій точці, можна отримати шляхом розрахунків за наведеними вище залежностями, однаковим для будь-якої точки гвинтової поверхні.

Подальшим напрямком розвитку викладеного матеріалу, може бути вибір оптимального кроку розташування гвинтових траєкторій, при якому похибка триангуляції буде однаковою для всієї гвинтової поверхні.

Викладені результати можуть бути застосовані при проєктуванні високопродуктивного інструмента для обробки гвинтових поверхонь у сучасному машинобудуванні.

Список використаних джерел

1. Оробей, В. Ф., Дашченко, О. Ф., & Лимаренко, О. М. (2013). Метод граничних елементів у задачах з нестійкими рішеннями. *Праці Одеського політехнічного інституту*, 2(41), 27–31.
2. Амиро, І. Я., & Заруцки, В. А. (1980). *Теорія ребристих оболонок*. Наукова думка.
3. Гавриленко, Г. Д., & Трубицина, О. А. (2008). *Коливання та стійкість ребристих оболонок обертання*. Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України.
4. Бразалук, Ю. В., Євдокимов, Д. В., & Поляков, Н. В. (2008). Спільне застосування методу малого параметра та методу граничних елементів для чисельного вирішення еліптичних завдань із малими обуреннями. *Вісник ХНУ*, 703, 50–66.
5. Романюк, А., & Сторчак, А. (2010). Алгоритми триангуляції. *Вінницький національний технічний університет Комп'ютери та програми*, 1, 11–20.
6. Чопоров, С. В., Гоменюк, С. І., Лисняк, А. А., Аль-Омарі, М. В., & Алатамхан, Х. М. (2016). Триангуляція поверхонь при гібридному параметричному та неявному поданні. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 3, 542–549.
7. Krashanytsya, Y., & Hoshmandi, A. (2016). Triangulation method of bearing surfaces of aircraft systems. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, 8(135), 11–15.
8. Городецький, В. В., & Мартинюк, О. В. (2009). *Диференціальна геометрія в теоремах і задачах*. Книги ХХІ.
9. Борисенко, О. (1995). *Диференціальна геометрія та топологія*. Основа.
10. Родін, П. Р. (1977). *Основи формування поверхонь різанням*. Вища школа.
11. Равська, Н. С., Мельничук, П. П., Мамлюк, О. В., Ніколаєнко, Т. П., & Охріменко, О. А. (2013). *Основи формування поверхонь при механічній обробці*. СКД "Друк".

References

1. Orobei, V. F., Dashchenko, O. F., & Lymarenko, O. M. (2013). Metod hranychnykh elementiv u zadachakh z nestiikymy rishenniamy [Boundary element method in problems with unstable solutions]. *Pratsi Odeskoho politekhnichnoho instytutu – Proceedings of the Odessa Polytechnic Institute*, 2(41), 27–31.
2. Amyro, I. Ya., & Zarutsky, V. A. (1980). *Teoriia rebrystykh obolonok [Ribbed shell theory]*. Naukova dumka.
3. Havrylenko, H. D., & Trubytsyna, O. A. (2008). *Kolyvannia ta stiikist rebrystykh obolonok obertannia [Oscillations and stability of ribbed shells of rotation]*. Instytut mekhaniky im. S. P. Tymoshenka NAN Ukrainy.
4. Brazaluk, Yu. V., Yevdokymov, D. V., & Poliakov, N. V. (2008). Spilne zastosuvannia metodu maloho parametra ta metodu hranychnykh elementiv dlia chyselnoho vyrishennia eliptychnykh zavdan iz malymy oburenniamy [Joint application of the small parameter method and the boundary element method for numerical solution of elliptic problems with small perturbations]. *Visnyk KhNU – Bulletin of the Kharkiv Polytechnic Institute*, 703, 50–66.

5. Romaniuk, A., & Storchak, A. (2010). Alhorytmy trianhuliatsii [Triangulation algorithms]. *Vinnytskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kompiutery ta prohramy – Vinnytsia National Technical University Computers and Programs*, 1, 11–20.
6. Choporov, S. V., Homeniuk, S. I., Lysniak, A. A., Al-Omari, M. V., & Alathamkhan, Kh. M. (2016). Trianhuliatsiia poverkhon pry hibrydnomu parametrychnomu ta neiavnomu podanni. [Surface triangulation in hybrid parametric and implicit representation]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of the Kherson National Technical University*, 3, 542–549.
7. Krashanytsya, Y., & Hoshmandi, A. (2016). Triangulation method of bearing surfaces of aircraft systems [Triangulation method of bearing surfaces of aircraft systems]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika ta tekhnolohiia – Aerospace engineering and technology*, 8(135), 11–15.
8. Horodetskyi, V. V., & Martyniuk, O. V. (2009). Dyferentsialna heometriia v teoremax i zadachakh [Differential geometry in theorems and problems]. *Knyhy XXI*.
9. Borysenko, O. (1995). *Dyferentsialna heometriia ta topolohiia [Differential geometry and topology]*. Osnova.
10. Rodin, P. R. (1977). *Osnovy formoutvorennia poverkhon rizanniam [Fundamentals of surface shaping by cutting]*. Vyshcha shkola.
11. Ravska, N. S., Melnychuk, P. P., Mamliuk, O. V., Nikolaienko, T. P., & Okhrimenko, O. A. (2013). *Osnovy formoutvorennia poverkhon pry mekhanichnii obrobsi [Fundamentals of surface shaping during machining]*. SKD "Druk".

Отримано 05.05.2025

UDC 621.914(075.8)

Valerii Solodkyi

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: solodkiyv@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2595-5436>, ResearcherID: MZQ-5574-2025

TRIANGULATION OF HELICAL SURFACES IN FORMING PROCESSES

Using modern triangulation methods allows simplifying problems of representing complex shaped surfaces when studying processes of forming parts and designing shaped cutting tools.

The main problem in solving shaping problems is the problem of adequate representation of local differential characteristics of the surface, namely: tangent, normal, curvature and torsion. The surface represented by a set of flat triangulation elements has only discrete values of the specified parameters of the local geometry of the surface, while for the nominal surface of the part they are continuous.

Analysis of research and publications on triangulation of shaped helical surfaces by flat finite elements showed that the use of flat elements introduces significant errors into the study of shaping processes and the search for a theoretically accurate profile of the cutting tool.

The aim of the article is to develop the method for triangulating a helical surface using helical trajectories, which makes it possible to move from discrete representation of differential characteristics of helical surface to continuous one and to formulate mathematical dependencies that describe characteristics of the surface.

Based on the differential theory of surfaces, the method for triangulating helical surface with spatial cylindrical elements whose boundaries are helical trajectories of the points of the end section of the part has been developed. Criteria for reliable representation of the triangulated surface have been formulated. Mathematical dependencies have been derived for determining differential characteristics of the local geometry of the surface after its triangulation by helical trajectories.

In the article, the method for triangulating helical surface using a set of helical trajectories was proposed for the first time, which allows moving from discrete determination of differential characteristics of the local geometry of the triangulated surface to continuous one. The presented materials can be used to study processes of forming and search for the profile of the initial tool surfaces in conventional processes of processing parts.

Keywords: triangulation, helical surfaces, forming.

Fig.: 4. References: 11.

Volodymyr Haievskiy¹, Oleh Haievskiy², Dmytro Usenko³

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.gaevskiy@kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107), **SCOPUS Author ID:** [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Welding
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ggoa@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661), **SCOPUS Author ID:** [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

³Applicant for Higher Education

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: dima.natten@gmail.com

DETERMINATION OF THE APPLICABILITY OF THE NORMAL AND WEIBULL DISTRIBUTIONS TO THE DIAMETER OF WELDED PORES

The adequacy of the application of the normal and Weibull distributions to the variability of weld pore diameters is analyzed. It is shown that, despite the visual similarity of the Weibull distribution to the visualization of the experimentally obtained distribution of pore diameter values, according to the Pearson agreement criterion, the normal distribution describes the variability of pore diameter values six times better than the Weibull distribution. The obtained results provide grounds for the direct application of standardized statistical tools to the statistical analysis of the variability of weld pore diameter.

Keywords: weld porosity; variability; statistical distribution; Pearson's criterion; pore diameter.

Table: 4. Fig.: 4. References: 12.

Urgency of the research. A global trend today is the use of a risk-based approach when making decisions regarding the quality of welded products [1; 2]. One of the methods for reducing the risks of non-compliance with the quality requirements of welded products is to replace the control of actual defect levels with statistical control of quantitative indicators that determine the appearance of defects. Such a quantitative indicator is the pore diameter. At the same time, standardized statistical control tools for continuous features assume that the variability of the controlled indicator is subject to a normal distribution. Thus, determining a statistical distribution that adequately describes the variability of the pore diameter of a weld is a relevant task related to creating conditions for reducing the risks of failure to meet porosity requirements during welding using standardized statistical tools.

Target setting. The allowable porosity in the weld metal is determined by their diameter and number per unit length of the weld [3]. It is the diameter and number of pores that determine the reduction in the cross-sectional area of the weld and, as a result, the reduction in the ability to work under static loads. The diameter of the pores significantly affects their ability to form stress concentrators. Thus, to ensure the uniform strength of the weld metal under static and dynamic loading conditions, it is important to monitor the number of pores per unit length of the weld and their diameter values.

The value of the number and diameter of pores is a random variable. The use of a distribution that adequately describes the variability of a random variable makes it possible to use the entire arsenal of standardized statistical tools available for such a distribution (control charts, reproducibility indices, workability indices, etc.). Pore diameter is a continuous statistical characteristic. The vast majority of statistical tools for analyzing continuous data are based on the normal distribution [4, 5]. At the same time, there are a significant number of arguments in favor of both the application of the normal distribution and the application of the Weibull distribution to the variability of pore diameter. Therefore, determining the distribution that should be preferred when analyzing data on pore diameter variability actually means determining the possibility of directly applying most standardized statistical tools to such an important indicator as pore diameter or the necessary adaptation of these tools to the Weibull distribution.

Actual scientific researches and issues analysis. The variability of the number of pores per unit length of the weld is adequately described by Poisson's law [6]. This allows the use of standardized c-maps and u-maps for statistical control of the number of pores without additional measures [4].

It is generally accepted that the variability of product quality indicators and production processes, which are related to a continuous statistical characteristic, is subject to a normal distribution [7; 8]. This is usually supported by a large number of factors simultaneously influencing the values of such indicators, approximately the same level of influence of each factor, which corresponds well to the conditions of the central limit theorem. As a result, the probability density of the indicator value is determined by the Gauss-Laplace function. In application to the variability of the pore diameter according to the normal distribution:

$$f(d_*; \mu; \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{d_* - \mu}{\sigma} \right)^2. \quad (1)$$

where d_* - is the value of the pore diameter, mm;

μ – mathematical expectation of the pore diameter value, mm;

σ – standard deviation of the pore diameter value, mm;

The normal distribution curve is a symmetrical, bell-shaped Gaussian curve. This distribution is the basis of most statistical tools for analyzing continuous data and in 90 % of cases such tools can be applied to product and welding process parameters without additional measures [9].

A large number of factors and the equivalence of their influence is a prerequisite for symmetry, and therefore normality, of the distribution of the indicator values. If the subject of the study is the indicator of the size (diameter) of the defect, then it is necessary to take into account the fact that measures are being implemented to prevent the appearance of defects in relation to defects. The consequence of such actions is a deviation of the distribution from symmetry towards an increase in the probability of the appearance of defects (pores, slag inclusions) of smaller diameter. Thus, a “deformation”, a deviation from symmetry, of the distribution of defect diameter values occurs.

Studies conducted on ship hulls, fuel and lubricant storage tanks, and large-diameter pipelines [10] have shown that the distribution of pore diameter values deviates from the Gauss-Laplace function. Studies of the variability of pore diameter in the conditions of determining the resistance to pore formation during submerged arc welding have shown the possibility of using the two-parameter Weibull distribution [11; 12].

The value of the Weibull probability density distribution for a given limit value of the pore diameter d_* :

$$f(d_*; a_d; b_d) = \frac{b_d}{a_d} \left(\frac{d_*}{a_d} \right)^{b_d-1} \exp - \left(\frac{d_*}{a_d} \right)^{b_d}. \quad (2)$$

where a_d - scale parameter (size) of the Weibull distribution of pore diameter, mm;

b_d - shape parameter of the Weibull pore diameter distribution, dimensionless.

Uninvestigated parts of general matters defining. Recent studies have shown deviations from symmetry in the distribution of pore diameter values in welded joints and the adequacy of the use of the two-parametric Weibull distribution. However, there is no evidence on the applicability of the normal distribution to the analysis of pore diameter variability data compared to the Weibull distribution. Studies on the adequacy of applying statistical distributions to pore diameter variability are constrained by the limited number of pores that appear under constant pore formation conditions.

The research objective is to determine the possibility of applying a normal distribution to the analysis of data on pore diameter variability. Depending on the result obtained, a decision should be made on the possibility of applying standardized statistical data analysis tools without correction for distribution asymmetry.

The statement of basic materials. The initial data for the statistical analysis of the variability of the pore diameter were collected using the method of studying the resistance to pore formation using polyolefin tubes, set out in the work [4]. Table 1 presents experimental data on the distribution of pore diameters in these ranges. The accepted notations are n_i – number of pores registered in the diameter range, N_i – the number of pores whose diameters do not exceed the limit value of the i -th range, N – the total number of registered pores for which the diameter was determined, d_{*i} – upper limit value of the i -th range of pore diameters, $d_{cep,i}$ – the average value of the i -th range of pore diameters.

Table 1 – Experimental data on pore diameter distribution

№	Pore diameter range, mm	n_i , units	N_i , units	N , units	d_{*i} , mm	$d_{cep,i}$, mm
1	0...0,5	71	71	372	0,5	0,25
2	0,6...1,0	121	192		1,0	0,75
3	1,1...1,5	99	291		1,5	1,25
4	1,6...2,0	53	344		2,0	1,75
5	2,1...2,5	23	367		2,5	2,25
6	2,6...3,0	5	372		3,0	2,75
7	3,1...3,5	0	372		3,5	3,25

Source: developed by the authors.

According to the data in Table 1, a bar chart of the actual distribution of pore diameters was constructed.

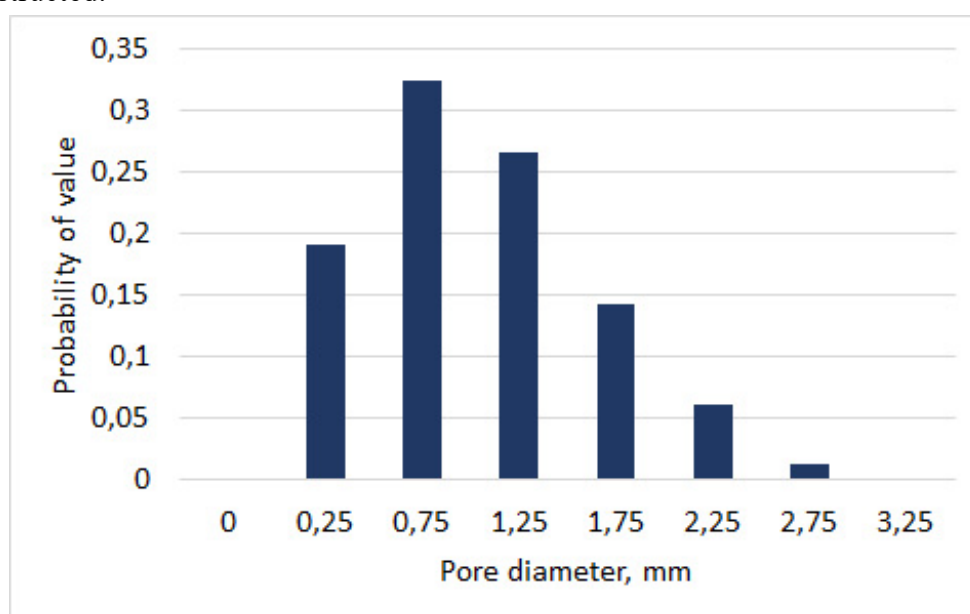


Fig. 1. Bar chart of actual pore diameter distribution

Source: developed by the authors

Visually, the bar chart (Fig. 1) shows the expected deviation from the symmetry of the normal distribution.

Using a probability grid based on experimental data, it is possible to determine the parameters of the Weibull distribution of pore diameter. To do this, you need to perform the following steps [12]:

Divide the range of possible pore diameter values into ranges of 0.5 mm width (see Table 1).

Record the number of pores detected, for each range separately, entering the results by n_i – the number of pore diameter measurements that fall within the range.

For each range limit d_{*i} (defined as the maximum value of the pore diameter falling within the range) determine N_i - the number of pores whose diameters do not exceed the limit value of the range (defined as the sum of all pores whose diameters do not exceed the limit value of the range).

Calculate the estimated probability of not exceeding the limit value of the pore diameter range:

$$F(d_{*i}) = \frac{N_i^{-3/8}}{N+1/4} \times 100\%. \quad (3)$$

where N – the total number of registered pores for which the diameter was determined.

Each range in which pores were recorded gives a point on the probability grid. The x coordinate of this point is d_{*i} – to the upper limit of the range of pore diameters, and the y coordinate to the calculated value $F(d_{*i})$ - estimated probability of not exceeding the limit value of the pore diameter range.

If the points on the probability grid are distributed along a straight line, this indicates that the pore diameter is indeed distributed according to the Weibull law. The location of the straight line approximating the position of the experimental points determines the quantitative values of the parameters of the Weibull pore diameter distribution.

To determine the parameters of the Weibull distribution, the data in Table 1 were converted into data for applying the probability grid in Table 2.

Table 2 – Experimental data for estimating the values of the size parameter a_d and form parameter b_d Weibull distribution of pore diameter

№	Pore diameter range, mm	N_i , units	N , units	d_{*i} , mm	$lg(d_{*i})$, mm	$F(d_{*i})$, %
1	0...0,5	71	372	0,5	-0,301	19,0
2	0,6...1,0	192		1,0	0,000	51,5
3	1,1...1,5	291		1,5	0,176	78,1
4	1,6...2,0	344		2,0	0,301	92,3
5	2,1...2,5	367		2,5	0,398	98,5
6	2,6...3,0	372		3,0	0,477	99,8
7	3,1...3,5	372		3,5	-0,301	99,8

Source: developed by the authors.

The data in Table 2 are plotted on a probability grid as points through which an approximating line is drawn. The result is shown in Fig. 2.

The value of the scale parameter a_d of the Weibull distribution is determined by the intersection point of the straight line, which approximates the results of the experimental determination of the pore diameter on the probabilistic grid, with the horizontal line $y = 0$. At this point, the probability of not exceeding the given diameter value is $d^* = a_d$ makes up $F(a_d) = 0,632$ (see Fig. 2). In the given data set (sample), the intersection point has the coordinate of the horizontal logarithmic scale $x = 0,18$. That is, in the given data set (sample) $lg(a_d) = 0,18$, therefore, $a_d = 10^{0,18} = 1,51$ (mm). The resulting value of the scale parameter $a_d = 1,51$ mm can be interpreted in such a way that under the investigated welding conditions, 63 % pores, have a diameter of no more than 1,51 mm.

Calculation formula for shape parameter b_d :

$$b_d = \frac{y}{\ln(d_{*i}/a_d)}. \quad (4)$$

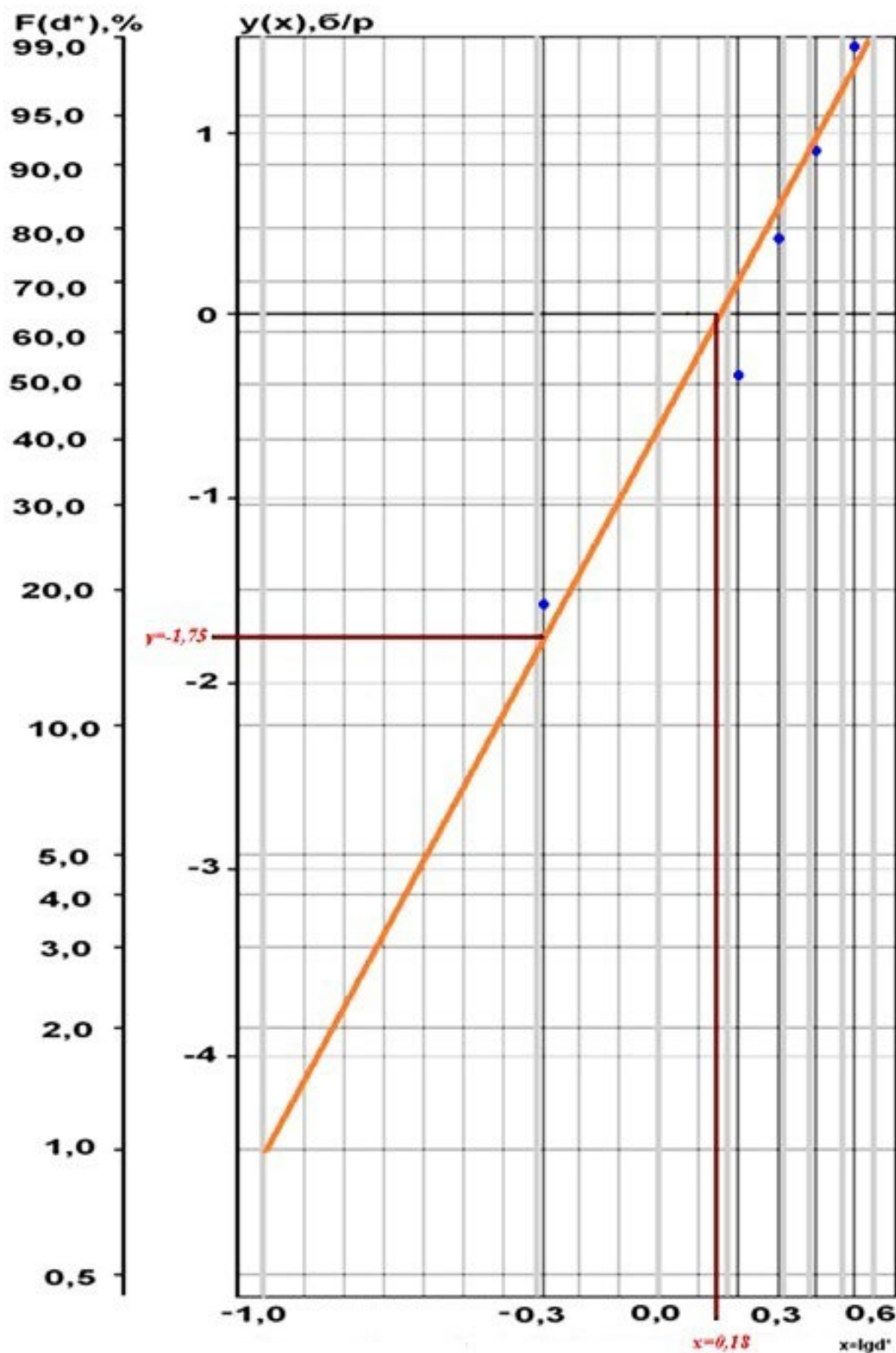


Fig. 2. Determination of pore diameter distribution parameters using a probabilistic grid

Source: developed by the authors.

To determine using a probability grid the value of bd - the shape parameter of the Weibull distribution, it is necessary for any pore diameter (in Fig. 2 the pore diameter is assumed $d^* = 0.5$ mm) find the corresponding value y (in Fig. 2 $y(0.5) = -1.75$). By substitution into the

formula (4), taking into account the previously found value of the scale parameter $a_d = 1.51$ mm, we find the value of the shape parameter for this distribution $b_d = 1.583$ (dimensionless).

At the same time, according to the Weibull distribution, the fraction of pores with a diameter not exceeding a given value d_* , can be found:

$$F(d_*; 1,51; 1,583) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{d_*}{1,51} \right)^{1,583} \right]. \quad (5)$$

The probability that the pore diameter becomes significant d_* (or close to d_*) mm:

$$f(d_*; 1,51; 1,583) = \frac{1,583}{1,51} \left(\frac{d_*}{1,51} \right)^{1,583-1} \exp - \left(\frac{d_*}{1,51} \right)^{1,583}. \quad (6)$$

Among the advantages of the graphical method of determining the parameters a_d and b_d of the Weibull distribution of pore diameters using a probability grid, it should be noted its extreme simplicity, clarity.

The normal distribution is defined by two parameters: μ – mathematical expectation and σ – standard deviation of a random variable.

From a sample of 372 pore diameter values divided into seven ranges (see Table 1), the values of the normal distribution parameters were found.

Mathematical expectation of pore diameter

$$\mu = \sum_{i=1}^7 d_{cepi} * \frac{n_i}{N}. \quad (7)$$

The standard deviation of the pore diameter is found as the square root of the variance of the pore diameter as a random variable

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \frac{n_i}{N} (d_{cepi} - \mu)^2}. \quad (8)$$

The data for calculating the parameters of the normal distribution of pore diameters are summarized in Table 3.

Table 3 – Data for calculating the parameters of the normal distribution of pore diameter

№	Pore diameter range, mm	n_i , units	d_{cepi} , MM	$d_{cepi} * \frac{n_i}{N}$, units	$\frac{n_i}{N} (d_{cepi} - \mu)^2$, units ²
1	0...0,5	71	0,25	0,047715	0,121845
2	0,6...1,0	121	0,75	0,243952	0,029079
3	1,1...1,5	99	1,25	0,332661	0,010752
4	1,6...2,0	53	1,75	0,249328	0,070011
5	2,1...2,5	23	2,25	0,139113	0,089181
6	2,6...3,0	5	2,75	0,036962	0,03889
7	3,1...3,5	0	3,25	0	0

Source: developed by the authors.

According to the data in Table 3, the values of the parameters of the normal distribution of pore diameters were established: $\mu = 1,049$ mm, $\sigma = 0,5998$ mm.

In this case, the probability that, according to the Weibull distribution, the pore diameter takes on the value d_* (or close to d_*) mm:

$$f(d_*; 1,049; 0,5998) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} * 0,5998} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{d_* - 1,049}{0,5998} \right)^2. \quad (9)$$

For comparison, Fig. 3 shows the probability density graphs of the pore diameter distribution according to the normal and Weibull distributions. The graphs are constructed using dependencies (6) and (9).

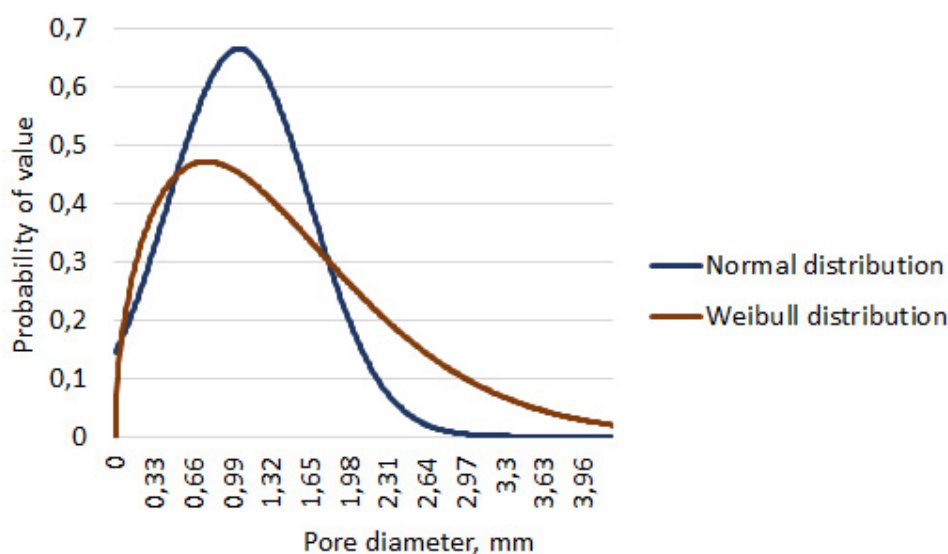


Fig. 3. Probability density of pore diameter according to normal $f(d;1.049;0.5998)$ and Weibull $f(d;1.51;1.583)$ distributions (probability functions)

Source: developed by the authors.

Of the two graphs shown in Fig. 3, the Weibull distribution $f(d;1.51;1.583)$ is closer to the bar chart of the actual pore diameter distribution (Fig. 1). Thus, visually, the Weibull distribution in shape better describes the variability of pore diameter and correlates with the results of the experimental study.

However, the adequacy of the application of the Weibull distribution and the normal distribution to the obtained experimental data should be verified using the Pearson consistency criterion.

The value of the Pearson consistency criterion (χ^2 criterion) is calculated:

$$\chi^2 = N \sum_i \frac{(n_i - N \cdot P_i)^2}{P_i} = \sum_i \frac{(n_i - N \cdot P_i)^2}{N \cdot P_i}. \quad (10)$$

where N – number of pores for which the diameter was measured, units;

n_i – experimentally registered number of pores in the i -th range, units;

P_i – the probability that the pore diameter is in the i -th range, calculated from the Weibull distribution or normal distribution, in fractions.

The value of P_i from the Weibull distribution can be calculated:

$$P_i = F(d_{*i}; a_d; b_d) - F(d_{*i+1}; a_d; b_d) = F(d_{*i}; 1.51; 1.583) - F(d_{*i+1}; 1.51; 1.583). \quad (11)$$

where $F(d_{*i}; a_d; b_d)$ – calculated according to the Weibull distribution, the fraction of pores whose diameter does not exceed the pore diameter of the upper (right) boundary of the i -th pore diameter range;

$F(d_{*i-1}; a_d; b_d)$ – calculated according to the Weibull distribution, the fraction of pores whose diameter does not exceed the pore diameter of the lower (left) boundary of the i -th pore diameter range.

The value of P_i according to the normal distribution can be calculated:

$$P_i = F(d_{*i}; \mu; \sigma) - F(d_{*i+1}; \mu; \sigma) = F(d_{*i}; 1.049; 0.5998) - F(d_{*i+1}; 1.049; 0.5998). \quad (12)$$

where $F(d_{*i}; \mu; \sigma)$ – calculated according to the normal distribution the fraction of pores whose diameter does not exceed the pore diameter of the upper (right) boundary of the i -th pore diameter range;

$F(d_{*i-1}; \mu; \sigma)$ – calculated according to the normal distribution the fraction of pores whose diameter does not exceed the pore diameter of the lower (left) boundary of the i -th pore diameter range.

The results of calculations for the value of the Pearson consistency criterion when applying the Weibull distribution and the normal distribution to the variability of the pore diameter (see Table 1) are given in Table 4.

Table 4 – Data for calculating the value of the Pearson test (χ^2 test)

№	Pore diameter range, mm	n_i , units	According to the Weibull distribution		According to normal distribution	
			P_i	χ_i^2	P_i	χ_i^2
1	0...0,5	71	0,160946	2,068302	0,180016	0,243024
2	0,6...1,0	121	0,232393	13,80775	0,287429	1,853115
3	1,1...1,5	99	0,208896	5,833139	0,306505	1,978527
4	1,6...2,0	53	0,15688	0,492199	0,169627	1,617033
5	2,1...2,5	23	0,104702	6,530908	0,048645	1,329126
6	2,6...3,0	5	0,06379	14,78324	0,007207	2,005718
7	3,1...3,5	0	0,036015	13,3976	0,00055	0,204436
The value of the Pearson test (χ^2 test)			56,91313		9,23098	

Source: developed by the authors.

A larger value of the Pearson consistency criterion corresponds to a larger deviation of the calculated value according to the statistical distribution from the experimental value according to the actual distribution of the random variable (see (10)). According to Table 4, the normal distribution provides a total of six times smaller value of the Pearson χ^2 criterion compared to the Weibull distribution. The marginal ranges of pore diameters make a particularly large contribution to the formation of the χ^2 value for the Weibull distribution (Fig. 4).

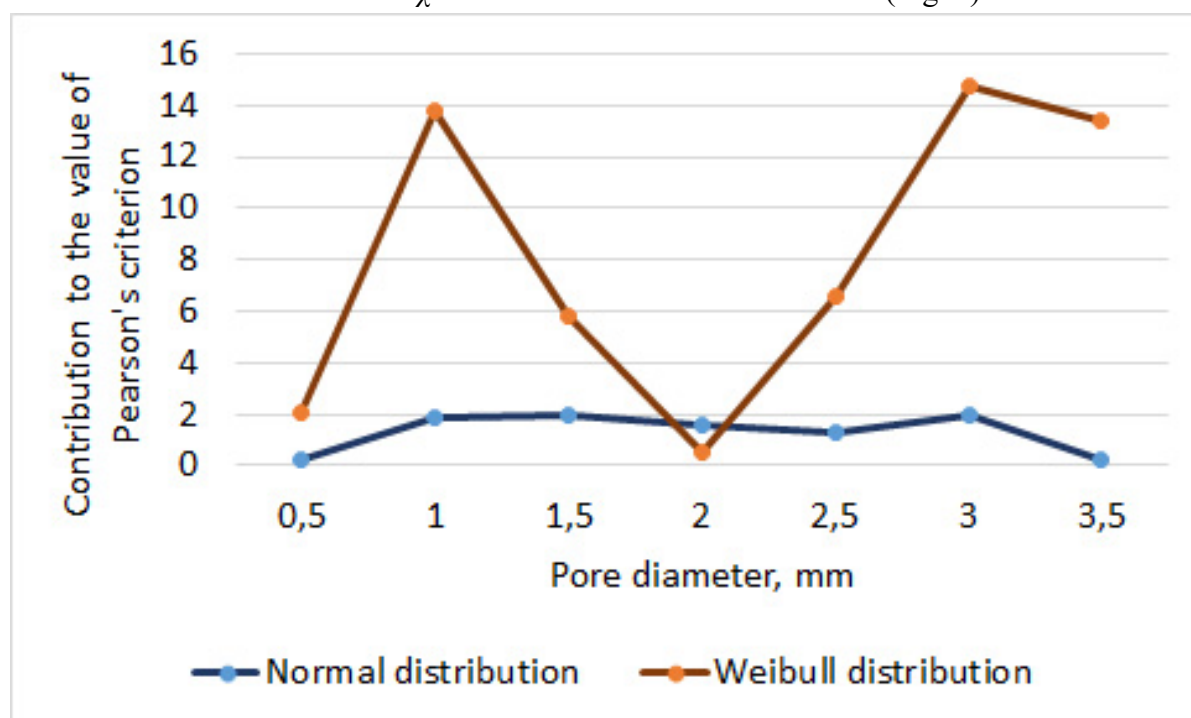


Fig. 4. Contribution of pore diameter ranges to the value of the consistency criterion for the application of the normal distribution and the Weibull distribution

Source: developed by the authors.

The value of the Pearson criterion was determined by $f = 7$ ranges of pore diameter, therefore the number of degrees of freedom of the studied system:

$$r = f - 1 = 7 - 1 = 6 . \quad (13)$$

For six degrees of freedom and a significance level of $\alpha=0.1$ (10%), the maximum allowable value of the Pearson criterion is: 10.645 [5]. For a normal distribution, the value of $\chi^2 = 9.23098$ is less than the maximum allowable value, which indicates the possibility of using a normal distribution for statistical analysis of data on the variability of pore diameter. It should also be noted that for a normal distribution, the χ^2 value is formed uniformly throughout the entire investigated range of pore diameters (see Fig. 4). At the same time, despite the apparent similarity of the Weibull distribution to the actual diameter distribution, its use for quantitative statistical analysis of data on pore diameter variability is undesirable. This is due to the fact that the value of $\chi^2 = 56.91313$ for the Weibull distribution significantly exceeds the permissible 10.645. At the same time, the deviations of the calculated from the actual values are especially significant for relatively small and, conversely, large pore diameters.

Conclusions.

Using experimentally obtained data on weld porosity, a comparison of the possibilities of applying data analysis on pore diameter variability using the normal distribution and the Weibull distribution was made.

An apparent comparison of the probability density graphs of the pore diameter distribution according to the normal, Weibull distribution with the actual experimental distribution of pore diameters shows the closeness of the Weibull distribution in shape to the actual distribution. However, the value of the Pearson consistency criterion for the Weibull distribution is 6 times greater than the value of $\chi^2 = 9.23098$ for the normal distribution. The use of the normal distribution for quantitative analysis of data on pore diameter variability is also supported by the fulfillment of the condition for the adequacy of the application of the normal distribution according to the Pearson consistency criterion, namely $\chi^2 = 9.23098 < 10.645$.

The results obtained make it possible to use standardized tools and methods based on the normal distribution for quantitative statistical analysis of data on pore diameter variability. In fact, this is the entire line of tools for statistical analysis of continuous data.

A possible direction for further research is to define statistical models that adequately describe the variability of slag inclusions in welded joints. The availability of such models will simplify the analysis of risks of extending the service life of potentially hazardous objects.

A statement on the use of generative AI and AI-based technologies in the writing process. In the process of writing the article, generative artificial intelligence and technologies based on generative artificial intelligence were not used.

References

1. Rehacek, P. (2019). Risk Management as an Instrument of the Effectiveness of Quality Management System. *Quality - Access to Success*, 20(168), 93–96. https://www.researchgate.net/publication/330882949_Risk_management_as_an_instrument_of_the_effectiveness_of_quality_management_system.
2. Shackleton, D. N. (2006). Reducing Failure Risk in Welded Components. *Welding in the World*, 50(9-10), 92–97. <https://doi.org/10.1007/BF03263449>.
3. International Organization for Standardization. (2023). Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections (ISO 5817:2023). <https://www.iso.org/standard/80209.html>.
4. International Organization for Standardization. (2023). Control charts. Part 2: Shewhart control charts (ISO 7870-2:2023). <https://www.iso.org/ru/standard/78859.html>.
5. International Organization for Standardization. (1997). Statistical interpretation of data — Tests for departure from the normal distribution (ISO 5479:1997) <https://www.iso.org/ru/standard/22506.html>.
6. Haievskiy, V., Haievskiy, O., Puzik, O. (2023). Study of the variability of the number of pores per unit length of the weld. *Engineering sciences and technologies*, (3(33)), 68-75. DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-68-75.

7. Tsagris, M., Beneki, C., Hassani, H. (2014). On the Folded Normal Distribution. *Mathematics*, (2), 12-28. <https://doi.org/10.3390/math2010012>.
8. Peyman Amirafshari, Nigel Barltrop, Martyn Wright, Athanasios Kolios (2021). Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>.
9. Ling, M. (2023). Weld Quality Assessment and Control in Steel Structure Fabrication. *Journal of Steel Structures and Constructions*, 9(1), 1-2. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/weld-quality-assessment-and-control-in-steel-structure-fabrication.pdf>.
10. Amirafshari, P., Kolios, A. (2022). Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach. *International Journal of Fatigue*, 159, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>.
11. Haievskiy, V.O., Haievskiy, O.A., Zvorykin, K.O. (2019). Zastosuvannya ymovirnisnoi sitky dlia vyznachennia parametriv veibulivskoho rozpodilu diametru por [The use of a probability grid for determining the parameters of the Weibull diameter distribution, see]. *PolyWeld–2019: collection of reports of the international conference “Innovative technologies and engineering in welding”* (pp. 35-36).
12. Haievskiy, V. O., Haievskiy, O. A., Zvorykin, K. O. (2019). Vyznachennia parametriv Veibulivskoho rozpodilu diametru por [Determination of the parameters of the Weibull diameter distribution, see]. *Technological Systems*, (1(86)), 75-80. <http://technological-systems.com/index.php/Home/article/view/703/735>.

Список використаних джерел

1. Rehacek, P. (2019). Risk Management as an Instrument of the Effectiveness of Quality Management System. *Quality - Access to Success*, 20(168), 93–96. https://www.researchgate.net/publication/330882949_Risk_management_as_an_instrument_of_the_effectiveness_of_quality_management_system.
2. Shackleton, D. N. (2006). Reducing Failure Risk in Welded Components. *Welding in the World*, 50(9-10), 92–97. <https://doi.org/10.1007/BF03263449>.
3. International Organization for Standardization. (2023). Welding – Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) – Quality levels for imperfections (ISO 5817:2023). <https://www.iso.org/standard/80209.html>.
4. International Organization for Standardization. (2023). Control charts. Part 2: Shewhart control charts (ISO 7870-2:2023). <https://www.iso.org/ru/standard/78859.html>.
5. International Organization for Standardization. (1997). Statistical interpretation of data — Tests for departure from the normal distribution (ISO 5479:1997) <https://www.iso.org/ru/standard/22506.html>.
6. Haievskiy, V., Haievskiy, O., Puzik, O. (2023). Study of the variability of the number of pores per unit length of the weld. *Engineering sciences and technologies*, (3(33)), 68-75. DOI 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-68-75.
7. Tsagris, M., Beneki, C., Hassani, H. (2014). On the Folded Normal Distribution. *Mathematics*, (2), 12-28. <https://doi.org/10.3390/math2010012>.
8. Peyman Amirafshari, Nigel Barltrop, Martyn Wright, Athanasios Kolios (2021). Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>.
9. Ling, M. (2023). Weld Quality Assessment and Control in Steel Structure Fabrication. *Journal of Steel Structures and Constructions*, 9(1), 1-2. <https://www.hilarispublisher.com/open-access/weld-quality-assessment-and-control-in-steel-structure-fabrication.pdf>.
10. Amirafshari, P., Kolios, A. (2022). Estimation of weld defects size distributions, rates and probability of detections in fabrication yards using a Bayesian theorem approach. *International Journal of Fatigue*, 159, 106763. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106763>.
11. Гаєвський, В. О., Гаєвський, О. А., Зворикін, К. О. (2019). Застосування ймовірнісної сітки для визначення параметрів вейбульівського розподілу діаметра пор. У *PolyWeld–2019: Матеріали міжнародної конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні»* (с. 35–36). КІП ім. Ігоря Сікорського.
12. Haievskiy, V. O., Haievskiy, O. A., & Zvorykin, C. O. (2019). Визначення параметрів вейбульівського розподілу діаметру пор. *Технологические системы*, (86/1). <https://doi.org/10.29010/086.10>.

Отримано 10.06.2025

УДК 621.791.019

Володимир Гаєвський¹, Олег Гаєвський², Дмитро Усенко³

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: v.gaevskiy@kpi.ua, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3888-3107>

ResearcherID: [AAK-3955-2020](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107), **SCOPUS Author ID:** [57221567034](https://orcid.org/0000-0002-3888-3107)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри зварювального виробництва, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: ggoa@ukr.net, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0769-5661>

ResearcherID: [AAK-3936-2020](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661), **SCOPUS Author ID:** [57221567160](https://orcid.org/0000-0003-0769-5661)

³здобувач вищої освіти, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: dima.natten@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАСТОСОВНОСТІ НОРМАЛЬНОГО ТА ВЕЙБУЛІВСЬКОГО РОЗПОДІЛУ ДО ДІАМЕТРА ПОР ЗВАРНИХ ШВІВ

Допустимість пор у зварному шві визначається їх кількістю на одиницю довжини шва та діаметрами пор. Моніторинг кількісних показників допустимості пор дозволяє своєчасно реагувати на їх змінюваність і суттєво зменшувати ризики невиконання вимог до пористості. Такий моніторинг може бути реалізований з використанням стандартизованих інструментів за умови адекватності застосування статистичних розподілів, які відповідають цим інструментам.

Змінюваність кількості пор на одиницю довжини зварного шва адекватно описується розподілом Пуассона. Стосовно змінюваності діаметра пор попередніми дослідженнями аргументовано використання як нормального розподілу, так і розподілу Вейбулла.

Адекватність застосування статистичних розподілів до змінюваності діаметра пор досліджена по даних, отриманих при однакових умовах їх утворення.

Оцінені значення параметрів нормального та Вейбулівського розподілів діаметру пор для вибірки з 372 значень, отриманих при незмінних умовах експериментального дослідження стійкості до пороутворення. Параметри нормального розподілу визначені як вибіркове математичне сподівання та корінь квадратний від вибіркової дисперсії. Значення параметрів форми та масштабу розподілу Вейбулла знайдені з використанням ймовірнісної сітки. Показано, що візуально Вейбулівський розподіл краще описує фактичний розподіл діаметра пор. Проте значення χ^2 критерію узгодженості Пірсона для Вейбулівського розподілу у шість разів більше, ніж для нормального розподілу. При цьому виконується умова адекватності застосування нормального розподілу за критерієм узгодженості Пірсона.

Отримані результати дають можливість використовувати для кількісного статистичного аналізу даних про змінюваність діаметра пор стандартизовані інструменти та методи в основу яких покладено нормальний розподіл. Фактично це вся лінійка інструментів статистичного аналізу даних за безперервною ознакою.

Ключові слова: пористість зварних швів; змінюваність; статистичний розподіл; критерій Пірсона; діаметр пор. Табл.: 4. Рис.: 4. Бібл.: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-108-115](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-108-115)

УДК 676.84.059

Андрій Миронович Бриндас¹, Сергій Вікторович Терницький²¹аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)E-mail: Andrii.M.Bryndas@lpnu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-4575-6749>²кандидат технічних наук, доцент,доцент кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)E-mail: serhii.v.ternitskyi@lpnu.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3814-9762>. SCOPUS ID: 57210220196

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПЛОСКОЦИЛІНДРОВОГО ПРЕСА ДЛЯ ШТАНЦЮВАННЯ РОЗГОРТОК КАРТОННИХ ПАКОВАНЬ

Сучасний ринок картонного пакування характеризується високою конкуренцією та вимогами до якості, що зумовлює необхідність удосконалення технологій виробництва. Традиційні плоскі штанцювальні преси мають суттєві недоліки, такі як енергоємність, складність налаштування та нерівномірність навантаження, що призводить до зниження якості продукції. У статті запропоновано конструкцію плоскоциліндрового штанцювального преса, який уможливіє уникнення недоліків традиційних плоских пресів. Особливістю розробки є реверсивний механізм привода натискного циліндра, що дозволяє здійснювати штанцювання як під час прямого, так і зворотного ходу, підвищуючи продуктивність обладнання. Запропоновано кінематичну схему преса, обґрунтовано його конструктивні параметри та визначено ефективність запропонованого рішення для пакувальної індустрії.

Ключові слова: штанцювання; штанцювальний прес; картонне пакування; натискний циліндр; реверсивний привод.

Рис.: 3. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Сучасна кон'юнктура світових ринків характеризується вираженою орієнтацією на кінцевого споживача, що супроводжується значними коливаннями попиту та динамічною появою інноваційних технологій і продуктів [1]. У структурі ринку споживчого пакування картонні пакування займають вагому позицію, їхня частка оцінюється у 36 % від загального обсягу ринку, що у вартісному еквіваленті становить близько 400 мільярдів доларів США [2]. Згідно з прогностичними оцінками Світової Організації Пакування (*World Packaging Organisation*), ринок пакування демонструватиме подальше зростання, причому сегмент картонного пакування збереже свою значущість, незважаючи на перманентну конкурентну боротьбу з полімерними аналогами.

Визначальними факторами, що зумовили провідну роль картонного пакування на загальному ринку, є специфічні властивості вихідної сировини, особливості технологічних процесів виробництва, а також екологічні аспекти та управління відходами [3]. Картонне пакування, маючи сприятливі естетичні та експлуатаційні характеристики, широко застосовується для виготовлення різноманітних типів пакувань та пакувальних рішень.

Ключовою технологією у виробництві картонного пакування є процес штанцювання розгорток пакувань із подальшим формуванням об'ємних конструкцій пакування різноманітних конфігурацій. Використання плоскої штанцювальної форми уможливіє виготовлення розгорток картонних пакувань, що різняться розмірами та геометричними параметрами [1, 4]. Виробничий цикл виготовлення картонного пакування передбачає послідовне виконання низки послідовних технологічних операцій. Сучасне штанцювальне обладнання конструюється за секційним принципом, його центральним елементом є штанцювальний прес, до функціональних параметрів якого висуваються жорсткі технічні вимоги.

Технологічний процес виробництва картонного пакування, особливо при великих та середніх накладках, передбачає переважне застосування плоских штанцювальних пресів. Специфіка функціонування таких пресів полягає в одночасному контакті робочих інструментів штанцформи з картонною заготовкою по всій площині обробки. За таких умов, досягнення високого рівня якості продукції, що характеризується точністю геометричних

розмірів, чистотою різу та чіткістю ліній бігування, можливе лише за значних навантажень у пресі, що забезпечуватиме прорізання картону та формування ліній згину та уможливлуватиме отримання готового пакування із точно заданими номінальними характеристиками. Крім того, критично важливим аспектом, що безпосередньо впливає на якість штанцювання, є забезпечення строго паралельного переміщення рухомої плити преса відносно нерухомої плити протягом усього кінематичного циклу роботи. Непаралельне зміщення рухомої плити, навіть на мікронному рівні, призводить до нерівномірного розподілу робочого навантаження по площині заготовки. Це своєю чергою спричиняє низку дефектів: неповне прорізання матеріалу в одних зонах та надмірне в інших, передчасний та нерівномірний знос інструментів штанцформи, підвищене навантаження на окремі елементи преса і, як наслідок, до суттєвого зниження якісних показників майбутнього картонного пакування та збільшення відсотка браку. Як результат штанцювальні преси плоского типу є конструктивно складними, енергоємними і відповідно дорогавартісними. Недоліків таких пресів позбавлені плоскоциліндрові штанцювальні преси, які одночасно ввібрали позитивні якості попередніх. У таких пресах використовується плоска штанцювальна форма з добре відпрацьованою технологією виготовлення. Вони характеризуються універсальністю, невисокою енергоємністю, простотою конструкції та зручністю обслуговування. За показниками продуктивності плоскоциліндрові преси не поступаються іншим типам пресів.

Залежність якості пакування від точності процесу штанцювання актуалізує проблему недосконалості традиційних плоских штанцювальних пресів, зокрема їхню конструктивну складність, енергоємність та труднощі в налагоджуванні, що безпосередньо впливає на якість продукції та рівень браку. Тому розроблення конструкцій плоскоциліндрових штанцювальних пресів, спрямованих на усунення недоліків при збереженні переваг, таких як універсальність та простота обслуговування, є актуальною задачею.

Постановка проблеми. Основною проблемою, якій присвячене це дослідження, є розроблення нових конструкцій плоскоциліндрових штанцювальних пресів. Передбачається, що такі конструкції дозволять усунути або значно мінімізувати недоліки, властиві традиційним плоским пресам, забезпечуючи при цьому стабільно високу якість процесу штанцювання картонних заготовок, підвищену продуктивність та покращену енергоефективність. Створення більш досконалих, надійних в експлуатації та економічно ефективних штанцювальних пресів є ключовим фактором інноваційного розвитку пакувальної індустрії, що забезпечує її конкурентоспроможність на глобальному ринку, а також відкриває перспективи для суттєвої оптимізації технологічних процесів, зниження собівартості кінцевої продукції та, як наслідок, підвищення її ринкової привабливості. Для стабільного функціонування пресів, побудованих за плоскоциліндровою схемою, необхідно вирішити технічні задачі: забезпечити рівномірне переміщення засобу створення тиску протягом часу штанцювання, мінімізувати негативний вплив інерційних навантажень внаслідок гальмування та розгону засобу створення тиску в крайніх положеннях, забезпечити короткотривалу його зупинку для подачі картонної заготовки, її фіксування та виведення відштанцьованого аркуша.

Вирішення окреслених проблем та, як наслідок, впровадження ефективних плоскоциліндрових штанцювальних пресів сприятиме підвищенню загальної ефективності, зниженню виробничих витрат та покращенню якості продукції. Таким чином, дослідження спрямоване на вирішення актуальної науково-технічної проблеми, що має значний ефект і важливе значення для розвитку пакувальної індустрії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері виробництва картонного пакування домінуючим типом обладнання залишаються штанцювальні преси плоского типу. Ключовим вузлом таких пресів є механізм, що забезпечує переміщення натискної плити

для реалізації технологічної операції штанцювання. У роботі [5] представлено аналіз конструктивних рішень механізмів пресів для різноманітного штанцювального та аналогічного обладнання, який виявив низку конструктивних недоліків, притаманних системам, реалізованим за схемою плоского штанцювання. Зокрема, дослідники [6] вказують на застосування важільних механізмів для привода натискної плити у пресах плоского типу, відзначаючи, що характер руху ланок таких механізмів спричиняє негативний вплив на якість одержуваних картонних розгорток, погіршує динамічну стабільність роботи пресового обладнання та обмежує його продуктивність. Альтернативний підхід, представлений ротаційними штанцювальними пресами, розглядається у праці [7], де запропоновано концепцію високошвидкісного штанцювального агрегата, функціонування якого, однак, висуває жорсткі вимоги до точності та надійності системи передачі руху, а також до гнучкості її налаштування.

Перспективним напрямком є розробка плоскоциліндрових пресів, конструкція яких базується на принципі мінімізації площі контактуючих поверхонь. Такі системи, як зазначено у [8], характеризуються універсальністю щодо діапазону товщин та форматів оброблюваного картону, а також оперативністю переналагодження. Застосування даної схеми дозволяє мінімізувати деформації нерухомого стола, а розміщення картонної заготовки безпосередньо на штанцювальній формі оптимізує процеси подачі та виведення матеріалу. У роботі [9] запропоновано методику для оцінки крутного моменту, що виникає при штанцюванні розгорток на пресах плоскоциліндрового типу, які, на думку авторів, поєднують переваги плоских та ротаційних систем. Проведений аналіз дозволив встановити залежність крутного моменту від низки факторів та описати її аналітично. Проте поза увагою дослідників залишилися аспекти механізму привода натискного циліндра. З метою забезпечення гнучкості переналагодження та зниження технологічних зусиль, у публікаціях [10; 11] також пропонується використання плоскоциліндрової схеми пресового обладнання. У цих роботах представлено оригінальні технічні рішення щодо конструктивного виконання пресів такого типу та методику розрахунку жорсткості пружних елементів приводу.

Таким чином, аналіз наявних наукових публікацій свідчить, що, попри значну кількість досліджень, присвячених різним аспектам процесу виготовлення розгорток споживчих картонних пакувань, питання розроблення конструкцій плоскоциліндрових штанцювальних пресів в цілому та механізмів привода натискного циліндра зокрема залишаються недостатньо вивченими.

Мета статті полягає в розробленні та теоретичному обґрунтуванні конструктивної схеми плоскоциліндрового штанцювального преса, призначеного для виробництва розгорток картонних пакувань.

Виклад основного матеріалу. Запропонована конструкція базується на принципі взаємодії циліндричного робочого органу з плоскою штанцювальною формою та спрямована на реалізацію переваг, властивих як плоским, так і ротаційним системам штанцювання. Ключовим аспектом є досягнення зменшення робочих навантажень в процесі штанцювання, що, у свою чергу, має забезпечити зниження енерговитрат на виробництво, при одночасному забезпеченні високого рівня продуктивності та гарантуванні належної якості кінцевої продукції.

Плоскоциліндровий штанцювальний прес повинен складатися із самонакладу для поштучної подачі аркушів картону, системи транспортування аркушів, секції штанцювання, секції видалення обрізків та роз'єднання розгорток картонних пакувань та приймального пристрою. Спрощена кінематична схема преса наведена на рис. 1.

Працює плоскоциліндровий прес наступним чином. Попередньо задруковані аркуші картону вкладають стосом 1 (рис. 1) на стіл самонакладу. У момент вистою ланцюгового транспортера 4 механізм самонакладу 2 через подавач 3 подає аркуш картону в захоплювачі каретки транспортера 5. Технологічний процес штанцювання відбувається під час

перекочування натискного циліндра 7 по нерухомій штанцювальній формі 6. Зворотно-поступальний рух каретка 8 натискного циліндра отримує від зубчатопасової передачі 10. Після штанцювання транспортерами 4 аркуш виводиться в стос приймального пристрою 9. Привід каретки натискного циліндра, а відповідно й самого циліндра здійснюється від електродвигуна 13 через клинопасову передачу 12.

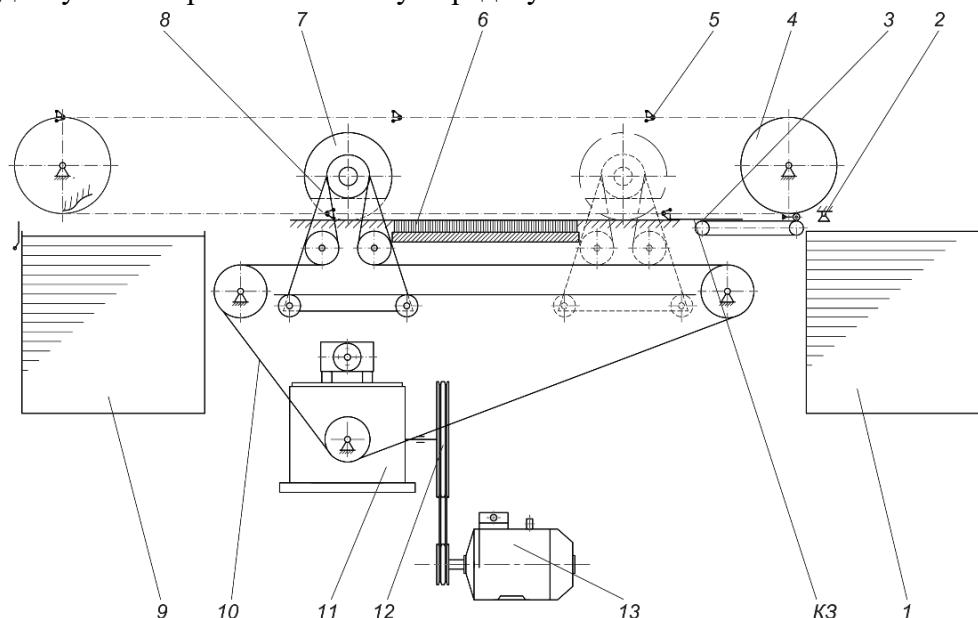


Рис. 1. Кінематична схема плоскоциліндрового штанцювального преса:

1 – стос картонних заготовок; 2 – механізм самонакладу; 3 – подавач;
4 – система транспортування заготовок; 5 – захоплювачі каретки транспортера;
6 – штанцювальна форма; 7 – натискний циліндр; 8 – каретка; 9 – приймальний пристрій;
10 – зубчатопасова передача; 11 – механізм зміни напрямку руху циліндра (реверсивний механізм);
12 – клинопасова передача; 13 – електродвигун

Джерело: розроблено авторами.

Процес функціонування плоскоциліндрового штанцювального преса реалізується наступним чином. Попередньо задруковані аркуші картону, укладені стосом 1 (рис. 1) на накладний стіл самонакладу, подавання аркушів у зону штанцювання здійснюється поаркушево. У фазу технологічного вистоя ланцюгового транспортера 4, механізм самонакладу 2 за допомогою спеціалізованого подавального пристрою 3 здійснює захоплення та транспортування одного аркуша картону до захоплювальних елементів (клапанів) каретки поздовжнього транспортера 5. Безпосередньо операція штанцювання розгортки картонного пакування відбувається під час перекочування натискного циліндра 7 по поверхні нерухомо встановленої плоскій штанцювальній формі 6, що містить висікальні та бігувальні лінійки, а за потреби й інший спеціалізований інструмент. Зворотно-поступальний рух каретки 8, що приводить натискний циліндр, забезпечується від зубчато-пасової передачі 10. Після завершення циклу штанцювання, аркуш картону за допомогою ланцюгових транспортерів 4 виводиться із робочої зони та укладається на приймальний стіл 9 у вигляді стосу. За потреби перед формуванням стосу готової продукції можна розмістити секції видалення обрізків та розділення розгорток на окремі одиниці.

Кінематична схема привода плоскоциліндрового преса організована таким чином (рис. 2). Первинний обертальний рух від електродвигуна 1 через пасову передачу 2 передається на головний приводний вал 3, забезпечуючи його односпрямоване обертання. Співвісно з цим валом, за допомогою шліцевого з'єднання 4, встановлена рухома напівмуфта 5 реверсивного механізму, яка може займати три дискретні робочі

положення. У середньому (нейтральному) положенні напівмуфти 5 забезпечується технологічний вистій реверсивного механізму. При аксіальному зміщенні напівмуфти 5 у праве положення відбувається її зачеплення з відповідною нерухомою напівмуфтою 6, обертальний рух відтак передається через конічну зубчасту передачу 7, 8 та зубчато-пасову передачу 9 на механізм привода каретки 12, що забезпечує переміщення натискного циліндра 13, забезпечуючи її прямолінійний поступальний рух (робочий хід). При аксіальному зміщенні рухомої напівмуфти 5 у ліве положення відбувається її зачеплення з другою нерухомою напівмуфтою 14, що реалізує реверсивний (зворотний) хід каретки. На торцевих поверхнях натискного циліндра 12 жорстко закріплені зубчасті вінці 16, які знаходяться у постійному кінематичному зачепленні з нерухомими зубчастими рейками 17, розташованими симетрично обабіч штанцювальної форми 18.

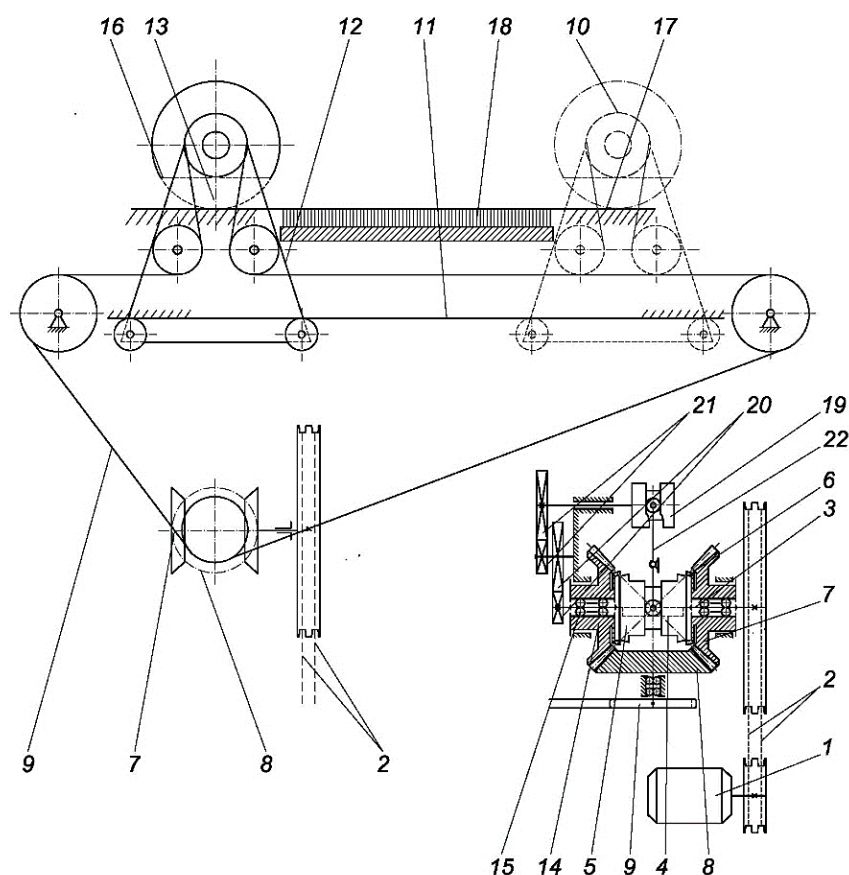


Рис. 2. Кінематична схема механізму привода плоскоциліндрового преса:

- 1 – електродвигун; 2 – пасова передача; 3 – головний вал; 4 – шліцеве з'єднання;
 5 – рухома напівмуфта; 6 – нерухома напівмуфта; 7 – конічна зубчаста шестерня;
 8 – конічне зубчасте колесо; 9 – зубчато-пасова передача; 10 – циліндр; 11 – нерухома
 напрямна; 12 – механізм привода каретки; 13 – натискний циліндр; 14 – нерухома
 напівмуфта; 15 – підшипник; 16 – зубчасті вінці; 17 – зубчасті рейки;
 18 – штанцювальна форма; 19 – кулачковий механізм; 20 – зубчаста передача;
 21 – зубчаста передача; 22 – важіль

Джерело: розроблено авторами.

Циклограма роботи плоскоциліндрового преса, що визначає точне співвідношення періодів поступального руху та технологічних зупинок натискного циліндра, задається профілем кулачкового механізму 19, який здійснює один повний оберт за один повний

кінематичний робочий цикл преса. Відповідно до заданої циклограми та необхідних кінематичних параметрів розраховуються передавальні відношення та геометричні параметри зубчастих передач 20 та 21. Слід також зазначити, що у конструкції механізму перемикання передбачено важіль 22, інтегрований із пружним елементом, функція якого полягає в забезпеченні надійного та стабільного спрацьовування фрикційної муфти при перемиканні напрямку руху.

Ключовою та суттєвою перевагою запропонованої кінематичної схеми привода плоскоциліндрового штанцювального преса є реалізація принципової можливості здійснення технологічної операції штанцювання не лише під час прямого, основного ходу натискного циліндра, що умовно може бути визначено як рух зліва направо за представленою схемою, але й під час його зворотного, реверсивного ходу, тобто при русі справа наліво. У традиційних конструкціях процес штанцювання відбувається виключно в одному напрямку руху робочого органу. У таких системах зворотний хід виконує суто допоміжну, не виробничу функцію, слугуючи лише для повернення механізму у вихідне положення для ініціації наступного робочого циклу. Такий підхід неминуче призводить до значних часових втрат, оскільки суттєва частка, а саме половина повного технологічного циклу, не використовується для виконання корисної технологічної роботи. На противагу цьому, у розробленій схемі, завдяки застосуванню реверсивної муфти, представленої елементами 5, 6 та 14, та інтегрованої системі керування, кожен напрямок поступального руху каретки із натискним циліндром (елементи 12, 13), може бути ефективно використаний як робочий хід. Це означає, що після завершення операції штанцювання одного аркуша картону під час руху, наприклад, у прямому напрямку, система подачі матеріалу, що включає самонаклад 2, подавач 3 та транспортер 5, має можливість оперативно подати наступний аркуш таким чином, щоб його обробка відбулася вже під час зворотного руху натискного циліндра.

Таким чином, реалізація можливості двостороннього штанцювання в запропонованій кінематичній схемі є не просто локальним конструктивним удосконаленням, а являє собою стратегічне інженерне рішення, спрямоване на збільшення продуктивності обладнання при збереженні якісних показників процесу штанцювання.

Висновки. Аналіз сучасного стану ринку картонного пакування та технологій його виробництва підтверджує актуальність розроблення штанцювальних пресів. Визначено, що перспективним напрямком є розроблення плоскоциліндрових штанцювальних пресів, які поєднують переваги плоских і ротаційних систем, забезпечуючи універсальність, меншу енергоємність та простоту конструкції. Запропоновано схему плоскоциліндрового штанцювального преса, що включає самонаклад, систему транспортування, секцію штанцювання з нерухомою формою та рухомим натискним циліндром, і приймальний пристрій. Детально описано оригінальну кінематичну схему механізму привода натискного циліндра, що базується на використанні реверсивної муфти та кулачкового механізму для керування циклом роботи. Ключовою перевагою запропонованого привода натискного циліндра плоскоциліндрового штанцювального преса є забезпечення можливості виконання технологічної операції штанцювання як під час прямого, так і під час зворотного ходу натискного циліндра, що уможливиле мінімізацію непродуктивних холостих ходів та більш раціонального використання робочого циклу.

Список використаних джерел

1. Rudawska, A., Čuboňova, N., Pomaraňska, K., Stančková, D. S., & Gola, A. (2016). Technical and organizational improvements of packaging production process. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 10(30), 182–192. <https://doi.org/10.12913/22998624/62513>.
2. Emblem, A., & Emblem, H. (2012). *Packaging technology: Fundamentals, materials and processes*. Oxford: Woodhead Publishing.

3. Kirwan, M. J. (2013). *Handbook of paper and paperboard packaging technology*. John Wiley & Sons.
4. Регей, І.І. (2011). *Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення)*. УАД.
5. Хведчин, Ю. Й. & Зелений, В. В. (2014). Аналіз механізмів преса штанцювальних автоматів. *Наукові записки*. 4 (49). 21–30.
6. Регей, І. І. & Керея, В. М. (2015). Механізм привода преса штанцювальної машини-автомата. *Упаковка*. 1. 62-63.
7. Fan, F., & Ding, H. (2010). The research and the application for the rotary die-cutting machine drive technology. *Proceedings of the International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE)*, Wuhan, China, 5914–5917.
8. Чехман, Я. І., Ткач, С. В. & Кравчук І. М. (2003). Особливості визначення зусиль при висіканні картону на плоско циліндровому пресі. *Наукові записки*. 6. 21–24.
9. Терницький, С. В. (2012). Оцінка максимального крутного моменту в штанцювальному пресі плоскоциліндрового типу для виготовлення розгорток картонних пакувань. *Поліграфія і видавнича справа*. 1. 80–89.
10. Регей, І. І., Федішин, Р. І. & Терницький С. В. (2008). Засоби штанцювання картону (обґрунтування конструктивних особливостей та технічних параметрів). *Упаковка*. 6. 29–31.
11. Регей, І. І., Федішин, Р. І. & Терницький, С. В. (2009). Засоби штанцювання картону (обґрунтування конструктивних особливостей та технічних параметрів). *Упаковка*. 1. 37–38.

References

1. Rudawska, A., Čuboňová, N., Pomarańska, K., Stančková, D & Gola A. (2016), Technical and organizational improvements of packaging production process, *Advances in Science and Technology*, Vol. 10, nr 30, 182–192. <https://doi.org/10.12913/22998624/62513>.
2. Emblem A., Emblem H. (2012). *Packaging technology Fundamentals, Materials and Processes*. Woodhead Publishing.
3. Kirwan, M. J. (2013). *Handbook of Paper and Paperboard Packaging Technology*. John Wiley & Sons.
4. Rehei, I.I. (2011). *Spozhyvche kartonne pakovannia (materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia) [Consumer cardboard packaging (materials, design, production equipment)]*. UAD.
5. Khvedchyn, Yu. Y. & Zelenyi, V. V. (2014). Analiz mekhanizmiv presa shtantsiuvalnykh avtomativ. [Analysis of the mechanisms of the barbell press.] *Naukovi zapysky – Scientific notes*. 4 (49). 21–30.
6. Rehei, I. I. & Kereia, V. M. (2015). Mekhanizm pryvoda presa shtantsiuvalnoi mashyny-avtomata [The press drive mechanism of the automatic trouser machine]. *Upakovka – Packaging*, 1. 62-63.
7. Fan Feiran, Ding Huiyao (2010). The research and the application for the rotary die-cutting machine drive technology. *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Wuhan*, 5914-5917.
8. Chekhman, Ya. I., Tkach, S. V. & Kravchuk I. M. (2003). Osoblyvosti vyznachennia zusyl pry vysikanni kartonu na plosko tsylindrovomu presi. [Peculiarities of determining the forces during cardboard die-cutting on a flat-cylinder press]. *Naukovi zapysky – Scientific notes*, 6, 21–24.
9. Ternytskyi, S. V. (2012). Otsinka maksymalnoho krutnoho momentu v shtantsiuvalnomu presi ploskotsylindrovoho typu dlia vyhotovlennia rozghortok kartonnykh pakovan. [Estimation of the maximum torque in a flat-cylinder bar press for the production of cardboard package reams]. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1, 80–89.
10. Rehei, I. I., Fedyshyn, R. I. & Ternytskyi S. V. (2008). Zasoby shtantsiuвання картону (obgruntuvannia konstruktyvnykh osoblyvostei ta tekhnichnykh parametriv). [Cardboard stretching equipment (justification of design features and technical parameters)]. *Upakovka – Packaging*, 6, 29–31.
11. Rehei, I. I., Fedyshyn, R. I. & Ternytskyi, S. B. (2009). Zasoby shtantsiuвання картону (obgruntuvannia konstruktyvnykh osoblyvostei ta tekhnichnykh parametriv). [Cardboard stretching equipment (justification of design features and technical parameters)]. *Upakovka – Packaging*, 1, 37–38.

Отримано 19.05.2025

Andrii Bryndas¹, Serhii Ternytskyi²

¹postgraduate student, Department of Computerized Systems of Printing and Packaging Industries,
Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: Andrii.M.Bryndas@lpnu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0004-4575-6749>

²PhD, Docent, Associate Professor, Department of Computerized Systems of Printing and Packaging Industries, Lviv
Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: serhii.v.ternytskyi@lpnu.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-3814-9762>. **SCOPUS ID:** 57210220196

DESIGN AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE FLAT CYLINDER PRESS FOR DIE-CUTTING OF PAPERBOARD PACKAGING CUT-OUTS

The modern paperboard packaging market is undergoing significant changes due to growing demand, high competition, and requirements on environmental friendliness and product quality. Paperboard packaging occupies more than a third of the global market, emphasising its economic significance. However, traditional, widely used flatbed die-cutting presses have several drawbacks: high energy consumption, difficulty in setting up and uneven load distribution, which decreases processing accuracy and packaging quality. These drawbacks limit production efficiency and increase product costs, making the search for alternative technical solutions relevant.

The main problem is the need to develop new designs of die-cutting presses that would eliminate the drawbacks of existing systems, in particular; ensure even loading, reduce energy consumption and increase productivity while maintaining quality. Flat-cylinder presses demonstrate prospects of this approach.

The study aims to develop a scheme for a flat-cylinder die-cutting press with a reversible drive mechanism that increases efficiency of manufacturing paperboard packaging cut-outs.

The work shows a detailed kinematic scheme of the press, including the mechanism of the reverse movement of the pressure cylinder. The proposed scheme uses a stationary die-cutting form and a movable pressure cylinder, providing consistent pressure and reducing energy consumption. The key innovation is the drive mechanism, which allows die cutting during the cylinder's forward and reverse strokes.

The proposed flat-cylinder die-cutting press is a promising solution for the packaging industry, as it combines advantages of different types of equipment, namely: versatility of flat presses, energy efficiency of rotary systems and high productivity due to double-sided die-cutting. Introduction of these presses will provide for optimisation of production processes, reducing the cost of production and increasing its competitiveness in the market. Further research may be aimed at improving automation systems and adapting the press to work with different types of cardboard materials.

Keywords: die-cutting; die-cutting press; cardboard packaging; pressure cylinder; reversible drive.

Fig.: 3. References: 11.

Дмитро Юрійович Бугров¹, Богдан Олегович Коробко²

¹аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: bugrov.dmitriy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4571-5147>

²доктор технічних наук, професор кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: korobko@nupr.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>. Scopus Author ID: 57190423064

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ У ВІБРОЗМІШУВАЧІ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Представлені результати експериментального дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки в спеціально розробленому віброзмішувачі з активним робочим органом – обертовою камерою. Ця установка забезпечує одночасну дію вібраційного збурення та обертального руху робочої камери на компоненти оброблюваного середовища, що інтенсифікує контактну взаємодію між абразивними тілами та деталями. Результати експерименту були оброблені методами математичної статистики, отримано рівняння регресії, яке визначає функціональну залежність зміни показника питомої швидкості знімання матеріалу від зміни основних параметрів. Отримані експериментальні дані підтверджують підвищення ефективності процесу при оптимальному співвідношенні значень амплітуди вібрацій, швидкості обертання робочої камери та маси силових середовища в ній.

Ключові слова: абразивна обробка; роторна камера; активний робочий орган; коефіцієнт ефективної взаємодії; енергоефективність.

Рис.: 7. Табл.: 3. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Інтенсифікація процесів обробки поверхонь із високими вимогами до якості, точності та продуктивності є одним із ключових напрямів сучасної інженерної технології. Віброабразивна обробка зарекомендувала себе як ефективний метод доведення та полірування деталей складної форми, однак її ефективність суттєво залежить від параметрів збурення робочого середовища. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження комбінованих методів віброобробки, які поєднують вібраційний вплив із керованим обертанням робочої камери. Такий підхід відкриває нові можливості для керування динамікою взаємодії між абразивом і деталями, зокрема через регулювання контактних навантажень та інтенсифікацію процесу знімання матеріалу. Запропоноване дослідження відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій механічної обробки та обґрунтовано потребами автоматизованого, енергоефективного і високопродуктивного виробництва. Зокрема, воно є актуальним для галузей машинобудування, авіаційної, автомобільної та оборонної промисловості, де точність обробки і якість поверхні відіграють критичну роль.

Постановка проблеми. Враховуючи актуальність вимог підвищення продуктивності та зниження енерговитрат до процесу віброобробки, особливого значення набуває пошук нових методів та способів, які дозволяють підвищити ефективність віброабразивної обробки шляхом керованого впливу на динаміку середовища, інтенсифікацію контактної взаємодії та оптимізацію енергоспоживання.

Більшість існуючого віброобладнання характеризується обмеженою технологічною гнучкістю та недостатньою здатністю до адаптації при зміні параметрів обробки. Через відсутність можливості контрольованого керування збурювальними силами в робочому середовищі з різним типом деталей і абразивними тілами не використовує повний потенціал обладнання, тим самим не досягається максимальна ефективність процесу в заданих умовах.

Актуальні дослідження по встановленню закономірностей впливу параметрів комбінованого процесу на продуктивність обробки та встановлення оптимальних режимів роботи обладнання. Це дасть змогу підвищити ефективність існуючих установок, а також закладає наукову основу для розробки нових віброабразивних машин комбінованого типу що мають більшу продуктивність та енергоефективність.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Аналіз наукової літератури свідчить, що віброабразивна обробка за умов класичного вібраційного збурення достатньо глибоко вивчена з погляду впливу амплітуди та частоти коливань на кінцеві результати обробки.

Питання інтенсифікації віброабразивної обробки та оптимізації умов взаємодії абразивного середовища з деталями розглядається у численних дослідженнях останніх років. Зокрема, у роботах [1–3] розглядається вплив параметрів вібрації (амплітуди, частоти, форми збудження) на інтенсивність знімання матеріалу та якість поверхні. Автори підкреслюють, що ефективність обробки значною мірою залежить від режимів збурення робочого середовища.

Згідно з результатами досліджень [4–5], лише незначна частка енергії, що подається на вібраційне збурення, безпосередньо бере участь у процесі знімання матеріалу з поверхні оброблюваної деталі. Під час класичної віброобробки в середовищі вільних абразивів лише приблизно 5-15 % енергії від загальної споживається безпосередньо на знімання матеріалу, решта – йде на втрати, зумовлені тертям, коливаннями та зношуванням абразивів.

У роботах [6-7] наведено, що причиною такої низької ефективності є складна динаміка переміщення частинок у середовищі, та енергія віброзбурення переважно витрачається на коливальний рух, що не забезпечує достатню сили контакту між абразивом і деталлю. Дослідники наголошують, що підвищення амплітуди чи частоти вібрацій не завжди призводить до зростання ефективності знімання – навпаки, надлишкове збурення знижує продуктивність.

Таким чином, аналіз існуючих досліджень підтверджує актуальність розробки нових комбінованих віброустановок та дослідження впливу зміни їхніх параметрів на продуктивність процесу з метою встановлення оптимальних режимів роботи обладнання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наявних публікацій і технічних розробок у сфері віброабразивної обробки засвідчує, що попри значну кількість існуючих досліджень, низка аспектів залишається недостатньо вивченою.

Зокрема, більшість наукових праць зосереджуються на дослідженні окремо вібраційного або обертового впливу в обробці вільними абразивами, у той же час комбіновані процеси, що поєднують ці впливи на робоче середовище, залишаються менш дослідженими. Недостатньо досліджено взаємозв'язок між змінами амплітудою вібрацій, частотою обертання і масою робочого середовища як взаємозалежних параметрів, що впливають на ефективність процесу абразивної обробки.

Мета статті. Метою цієї статті є обґрунтування ефективності комбінованого віброабразивного процесу в середовищі вільних абразивів та його експериментальне дослідження за допомогою спеціально розробленого віброзмішувача з активним робочим органом, що являє собою роторну робочу камеру

Отримання та аналіз експериментальної функціональної залежності продуктивності комбінованого процесу від зміни ключових параметрів обладнання.

Виклад основного матеріалу. Робоче середовище у віброабразивній обробці є сипучим та складається з великої кількості абразивних частинок та оброблюваних деталей, які взаємодіють між собою. У стані спокою така система може описуватись властивостями твердого тіла. Проте під дією певних зовнішніх сил, така система може набувати властивостей в'язкопружного тіла або навіть текучого середовища.

Під дією сил вібраційного збурення в робочій камері віброустановки виникають умови, за яких частинки абразиву набувають змінних швидкостей та прискорень, що спричиняє постійну зміну контактної сили взаємодії між ними. При певних значеннях прискорення, коли інерційна сила значно перевищує вагу частинки, сили нормального

тиску між частинками зменшуються або повністю зникають. Унаслідок цього сипуче середовище поводить себе подібно до рідини – спостерігається ефект псевдозрідження. Фізично ефект псевдозрідження проявляється у:

- 1) зменшенні коефіцієнта тертя між частинками;
- 2) перекочуванні частинок одна відносно одної без відриву;
- 3) посиленні циркуляційних потоків всередині об'єму середовища.

У барабанних галтовочних установках робоча камера обертається навколо горизонтальної осі, викликаючи рух сипучого середовища. Введемо безрозмірний критерій K_r , що описує характер його руху та визначається співвідношенням:

$$K_r = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус робочої камери;

ω – кутова швидкість обертання барабана;

g – гравітаційним прискоренням.

Розглянемо три основні характерні режими руху середовища у галтовці:

1. Режим повільного пересипання. Він спостерігається при низьких швидкостях обертання $K_r < 0,1$. Абразив і деталі частково захоплюються обертовою стінкою та піднімаються по ній, але створювана відцентрова сила є недостатньою для утримання частинок, тому вони вільно пересипаються у нижню частину камери під дією сили тяжіння. Утворюється рухомий шар частинок з похилою поверхнею середовища, що постійно оновлюється. Такий режим характеризується хаотичним рухом частинок середовища з низькою кінетичною енергією, їхніми короткочасними контактами невеликої сили та, як наслідок, низькою інтенсивністю обробки.

2. Основний робочий режим. Він спостерігається при середніх швидкостях обертання камери, коли $0,1 < K_r < 1$. Абразив та деталі піднімаються на більшу висоту (до $1/3$ - $1/2$ висоти камери), але втрачають контакт зі стінкою і вільно падають. При цьому режимі формується змінна контактна взаємодія частинок, що забезпечує ефективне зняття матеріалу за рахунок циклічного навантаження.

3. Режим ущільнення або центрифугування. Характерний для високих швидкостей обертання, при цьому $K_r > 1$. Відцентрова сила стає значно більшою за гравітацію. Кінетична енергія частинок в цьому режимі є найбільшою, але вона спрямована на підтримання синхронного обертання із камерою, при відсутності їх взаємного переміщення. Це й пояснює зниження ефективності обробки при надмірно високих швидкостях: кінетична енергія частинок є великою, але майже не перетворюється на корисну роботу в зоні контакту через відсутність ковзання та ударної взаємодії.

Як бачимо, повна кінетична енергія абразивної частинки в різних способах обробки у середовищі вільних абразивів, зокрема у віброобробці або галтовці може досягати значних величин, проте фактично лише її частина бере участь у процесі знімання матеріалу.

Розглянемо умовну схему руху однієї абразивної частинки відносно деталі (рис. 1). Частинка абразивного середовища W_m рухається з відносною швидкістю V_r і кутом удару θ у напрямку до деталі, значення якого визначається інтенсивністю коливального руху та циркуляції середовища. Після контактної взаємодії частинка відбивається від деталі з відносною швидкістю V_r' і кутом θ' .

Відносну швидкість V_r можна виразити як функцію амплітуди абразивного середовища A_r , кутової швидкості Ω і фазового кута φ таким чином:

$$v_r = A_r \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t + \varphi). \quad (2)$$

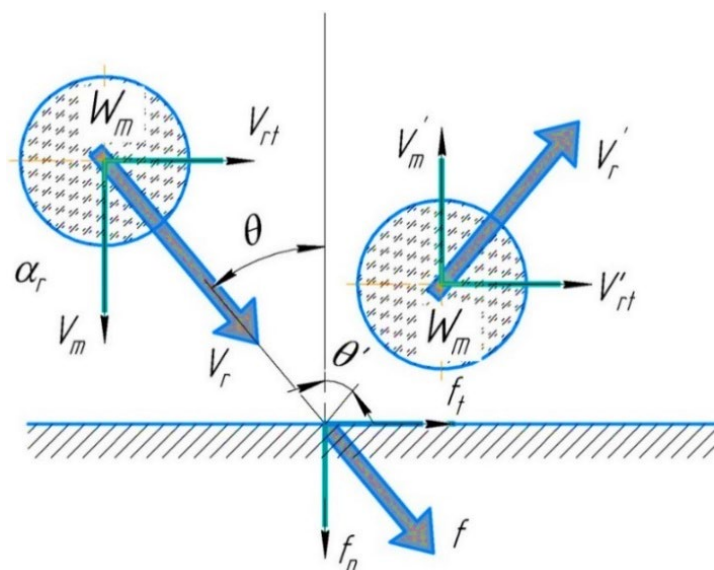


Рис. 1. Умовна схема руху абразивної частинки відносно деталі
Джерело: розроблено авторами.

Середню швидкість V_r можна отримати наступним чином:

$$\bar{v}_r = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega. \quad (3)$$

Середня тангенціальна швидкість до контакту V_r ідентична середній тангенціальній швидкості після контакту V_r' . Однак через поглинання, середні нормальні швидкості відрізняються:

$$\bar{v}_{rt} = \bar{v}'_{rt} = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega \cdot \sin \theta, \quad (4)$$

Нормальну силу, що діє на одиницю площі поверхні деталі, можна виразити так:

$$F_n' = n \frac{m_m}{g} \cdot \alpha_r \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

де n – кількість точок контакту абразивного середовища на одиницю площі;

m – вага кожного окремого абразивного елемента;

α_r – відносне прискорення між абразивним середовищем і оброблюваною деталлю;

θ – кут удару.

Результуючу тангенціальну силу можна визначити за формулою:

$$F_t' = F_n' \cdot \sin \theta. \quad (6)$$

Отже, кут удару θ та напрям швидкості частинки визначають ефективність удару: залежно від значення сили F_n , контакт може призводити до мікрорізання або пластичної деформації. Водночас при збільшенні прискорення спостерігається тенденція до зменшення θ , внаслідок чого частинка лише ковзає по поверхні. Це призводить до зменшення сили F_n та зниження передачі енергії в зону контакту, зменшення часу контактної взаємодії та зниження коефіцієнта тертя.

З метою кількісної оцінки кінетичної енергії, що йде на знімання матеріалу пропонується ввести безрозмірний параметр – коефіцієнт ефективної взаємодії K_e . Він визначає співвідношення між ефективною кінетичною енергією, яка бере участь у корисній роботі знімання матеріалу, та загальною кінетичною енергією системи:

$$K_e = \frac{E^*}{E_k}; \quad E^* = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_{i,n}^2}{2} \cdot \cos \theta_i; \quad K_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i v_{i,n}^2 \cdot \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n m_i v_i^2}, \quad (7)$$

де E^* – ефективна кінетична енергія, реалізована в зоні контакту;

E_k – загальна кінетична енергія частинок абразивного середовища;

m_i – маса окремої абразивної частинки;

$v_{i,n}$ – нормальна складова швидкості частинки при ударі по поверхні деталі;

θ_i – кут контакту (кут між напрямком руху частинки та нормаллю до поверхні в точці зіткнення);

n – кількість частинок, які беруть участь у контакті з поверхнею деталі протягом однієї секунди.

Очевидно, що $0 \leq K_e \leq 1$, причому значення, близьке до 1, свідчить про високий ступінь ефективної енергії, тоді як значення, близьке до 0, означає її суттєві втрати на неефективні процеси.

З метою підвищення продуктивності процесу віброобробки в середовищі вільних абразивів шляхом збільшення коефіцієнту ефективної взаємодії K_e , тобто енергії що йде безпосередньо на знімання матеріалу, пропонується новий комбінований спосіб обробки. Він полягає в поєднанні вібраційного збурення та обертального руху активного робочого органу. При цьому створюються особливі умови механічної взаємодії компонентів у робочій камері, що інтенсифікують циркуляцію абразивних тіл чим збільшується їх ефективна контактна взаємодія з поверхнями оброблюваних деталей. У результаті реалізується динамічна картина з множинними контактами різного характеру – ударного, ковзного, обертального. Саме в цьому поєднанні полягає ефект перерозподілу кінетичної енергії частинок: при збереженні загального енергетичного рівня середовища, істотно зростає частка тієї енергії, що безпосередньо витрачається на контактну взаємодію з поверхнею деталі. Тобто збільшується ефективна кінетична енергія E^* , яка використовується для знімання матеріалу.

Експериментальні дослідження комбінованої обробки проводились в лабораторії КБ «Вібротехніка» кафедри галузевого машинобудування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на спеціально розробленому віброзмішувачі з активним робочим органом (рис. 2).

Віброзмішувач побудований по модульному принципу, та має два функціонально незалежні, але взаємодіючі елементи:

1) Модуль обертальної робочої камери – це нова конструкція, яка встановлена на віброплатформу та має власний регульований привод роторної робочої камери.

2) Модуль віброплатформи – це промисловий вібраційний верстат для об'ємної фінішної обробки ВІО-8 [8-10], який у свій час використовувався для наукових досліджень науковцями під керівництвом доктора технічних наук, професора Л. І. Сердюка.

Рама 1 забезпечує надійну фіксацію обертальної робочої камери 5 та її привода 7. Її конструкція дозволяє інтегруватися з існуючим вібраційним верстатом ВІО-8, що використовується як віброплатформа. Її кріплення до віброплатформи здійснено за допомогою гвинтів.

Бокова стійка 3 виконана знімною для легкої інсталяції робочої камери 5. Вона кріпиться до поперечини рами 1 за допомогою гвинтового з'єднання В боковій стійці закріплено підшипниковий вузол 4, при чому внутрішнє кільце його підшипника має два радіальних гвинта для легкої фіксації та зняття валу робочої камери.

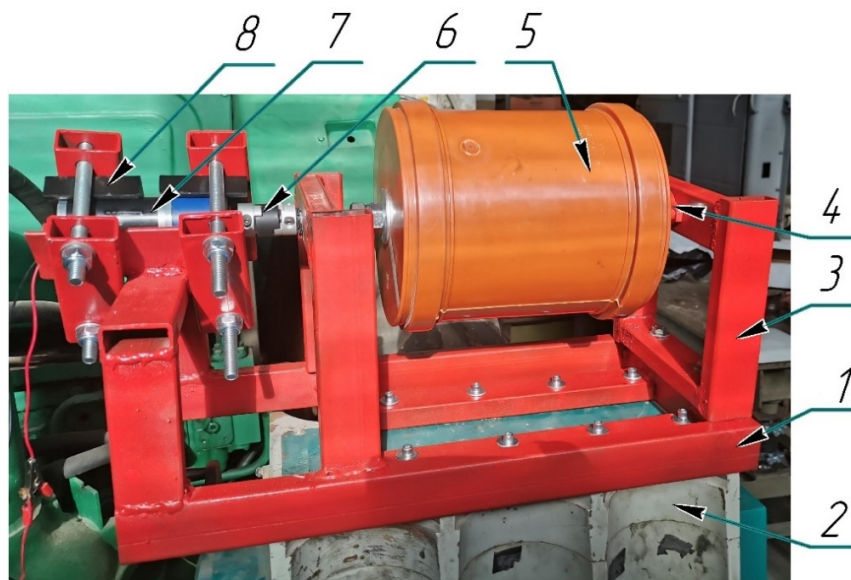


Рис. 2. Загальний вигляд дослідного віброзмішувача:

- 1 – рама; 2 – віброплатформа верстату ВІО-8; 3 – знімна стійка рами;
4 – підшипник; 5 – робоча камера (обертний барабан); 6 – муфта;
7 – електродвигун барабана; 8 – елементи кріплення електродвигуна

Джерело: розроблено авторами.

Робоча камери (рис. 3) складається з корпусу 1, двох кришок 2. Герметичність забезпечують два гумових ущільнювачі 4. Така конструкція дозволяє легко виконувати завантаження та вивантаження компонентів робочого середовища – абразивних тіл та оброблюваних деталей. Внутрішні розміри камери складають $\varnothing 157$ мм, довжина 200 мм, загальний об'єм становить 3,9 л.

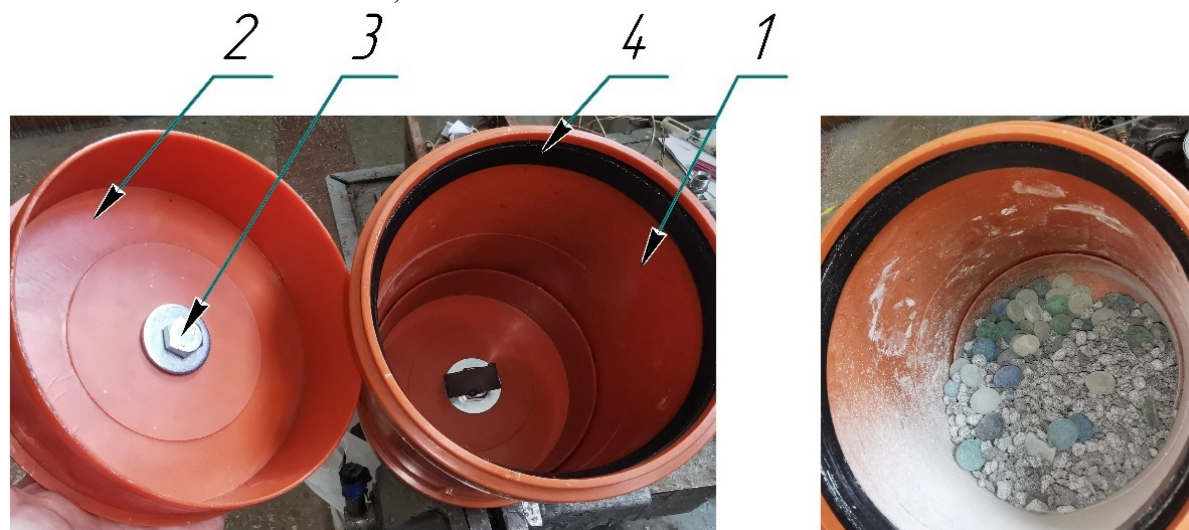


Рис. 3. Конструкція обертової робочої камери:

- 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – кріплення валу; 4 – ущільнювач кришки

Джерело: розроблено авторами.

Як вільний абразив робочого середовища використані галтовочні тіла марки TR 25A 10 СТ1 з електрокорунду середньої жорсткості, зернистість 125 мкм, форма скошений трикутник розмірами $6 \times 6 \times 6$ (мм).

Оброблюваними деталями обрані скляні декоративні елементи, форма яких наближена до сплюснутого еліпсоїда з діаметром приблизно 20 мм.



Рис. 4. Елементи робочого середовища та їх розміри:
а – гальтувальні тіла; б – декоративні елементи

Джерело: розроблено авторами.

Величина співвідношення об'єму деталей до об'єму гальтувальних тіл становить 1:3. Однак, оскільки об'єм залежить від маси та густини матеріалів, з практичного погляду зручніше використовувати масове співвідношення, наведене в табл. 1.

Таблиця 1 – Об'єм та маса компонентів робочого середовища

Заповнення камери, %	Об'єм середовища, л	Об'єм деталей, л	Об'єм абразиву, л	Маса деталей, кг	Маса абразиву, кг	Загальна маса, кг
30	1,17	0,39	0,78	0,98	2,2	3,2
40	1,76	0,59	1,17	1,5	3,3	4,8
60	2,34	0,78	1,56	1,95	4,4	6,4

Джерело: розроблено авторами.

З метою забезпечення об'єктивності порівняння отриманих експериментальних значень ефективності віброобробки введемо поняття питомої швидкості знімання матеріалу V_p . Цей показник визначає кількість знятого матеріалу, що припадає на одиницю маси оброблюваних деталей за одиницю часу й обчислюється за формулою:

$$V_p = \frac{m_0 - m_t}{m_0 \cdot t}, \left[\frac{\text{мг}}{\text{кг} \cdot \text{год}} \right] \quad (8)$$

де m_0 – початкова маса оброблюваних деталей;

m_t – маса оброблюваних деталей після обробки;

t – тривалість віброобробки.

З метою досягнення належної точності результатів тривалість проведення кожного експерименту становить 30 хвилин.

Основними факторами, що впливають на ефективність процесу, визначені:

- 1) амплітуда вібрацій робочої камери A .
- 2) частота обертання камери ω
- 3) маса завантаженого матеріалу m .

Діапазони варіювання факторів визначено на основі попередніх теоретичних досліджень та конструктивних обмежень установки. Кожен фактор варіювався на трьох рівнях: мінімальному, середньому та максимальному.

Таблиця 2 – Діапазони зміни та інтервали варіювання параметрів

Найменування	Розмірність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
Амплітуда вібрацій	мм	X_1	3	2	1	1
Частота обертання камери	об/хв	X_2	104	70	36	34
Маса компонентів	кг	X_3	5,6	4,2	2,8	1,4

Використовуючи механізм планування експерименту для знаходження ступеня впливу амплітуди вібрації, частоти обертання камери та маси середовища на ефективність роботи дослідної віброустановки знайдемо функціональну залежність впливу вищенаведених факторів на питому швидкість знімання матеріалу у вигляді

$$V_p = f(A, \omega, M). \quad (9)$$

Вплив дії вказаних факторів на питому швидкість знімання матеріалу відрізняється від лінійного, тому використовуємо трифакторний експеримент другого порядку на основі центрально-композиційного плану зі скоригованими зірковими точками.

У загальному вигляді для трифакторного експерименту:

$$y_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ij} x_i^2 + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j. \quad (10)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів;

Матриця планування експерименту та отримані результати вимірювань наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Реалізація плану експерименту

№ досл.	Код	Амплітуда вібрацій, мм	Код	Частота обертання камери, об/хв	Код	Маса компонентів, кг	Питома швидкість знімання матеріалу, мг/(кг*год)
1	+	3	+	104	+	6,4	320
2	—	2	+	104	+	6,4	300
3	+	3	—	36	+	6,4	200
4	—	1	—	36	+	6,4	190
5	+	3	+	104	—	3,2	230
6	—	1	+	104	—	3,2	210
7	+	3	—	36	—	3,2	140
8	—	1	—	36	—	3,2	120
9	+	3	0	70	0	4,8	280
10	—	1	0	70	0	4,8	270
11	0	2	+	104	0	4,8	300
12	0	2	—	36	0	4,8	180
13	0	2	0	70	+	6,4	280
14	0	2	0	70	—	3,2	220
15	0	2	0	70	0	4,8	320
16	0	2	0	70	0	4,8	330
17	0	2	0	70	0	4,8	310

Отримані результати дослідів обробляємо методами математичної статистики та одержуємо рівняння регресії:

$$V_p = 300 + 8x_1 + 53x_2 + 37x_3 - 10x_1^2 - 45x_2^2 + 35x_3^2 + 1,3x_1x_2 - 1,3x_1x_3 + 6,3x_2x_3. \quad (11)$$

Отримане рівняння перевірено на адекватність за критерієм Фішера та встановлено, що розрахункове значення критерію менше, ніж граничне. Тому розроблена на основі багатофакторного аналізу функціональна залежність адекватно описує вплив основних факторів на величину питомої швидкості знімання матеріалу.

Використовуючи прикладні програми та вихідні значення діапазонів діючих факторів з табл. 2 за отриманою залежністю (11) побудовані та зображені на рис. 5-7 графіки залежності питомої швидкості знімання від зміни параметрів.

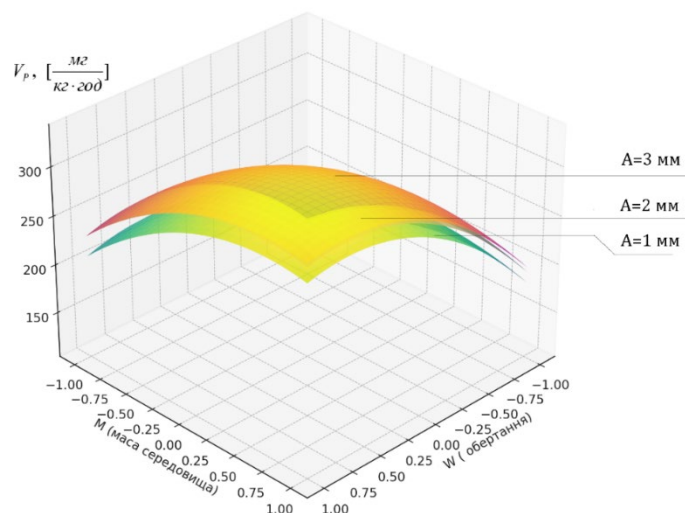


Рис. 5. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від маси та частоти обертання для різної амплітуди вібрацій

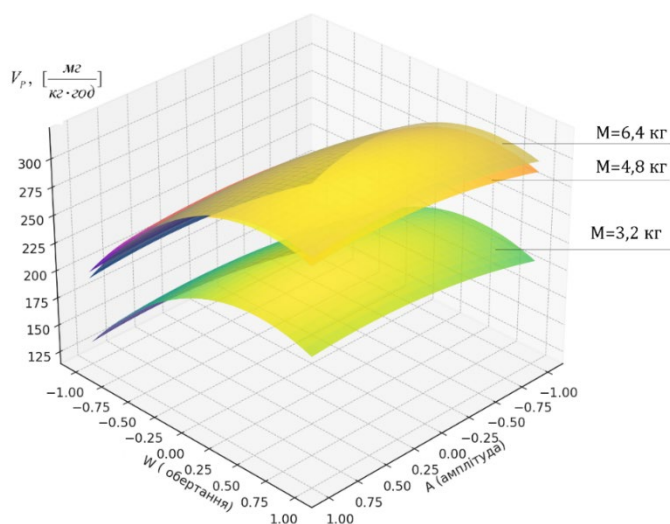


Рис. 6. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди та частоти обертання для різної маси середовища

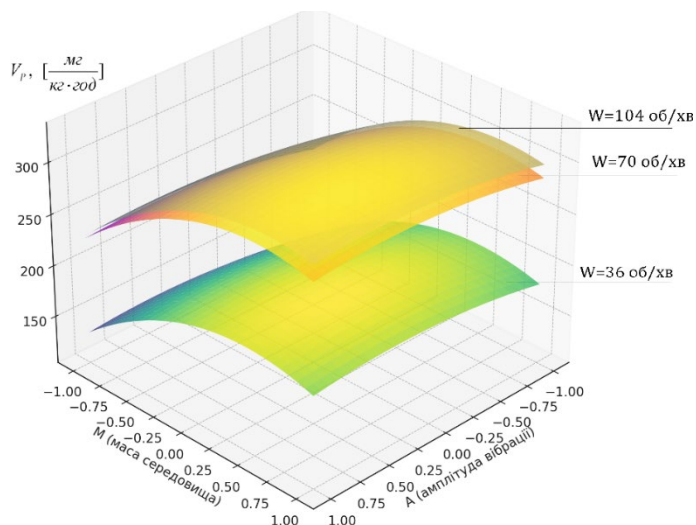


Рис. 7. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди та маси для різної частоти обертання робочої камери

Наведені графіки мають чітко виражену опуклу форму, що свідчить про наявність оптимумів продуктивності у дослідженому інтервалі параметрів. Тому є доцільність подальших досліджень по визначенню оптимальних режимів для вдосконалення технології.

Значення питомої швидкості знімання матеріалу змінювалась у межах від 120 мг/(кг·год) до 330 мг/(кг·год) залежно від комбінації різних значень амплітуди вібрацій, частоти обертання камери та маси середовища. Максимум продуктивності становив 330 мг/(кг·год) та досягався при середньому значенні параметрів, зокрема при $A = 2$ мм, $W = 70$ об/хв, $M = 4,8$ кг. Найменша питома швидкість знімання становить 120 мг/(кг·год) та відповідає мінімальним значенням усіх трьох факторів.

Хоча режим комбінованої віброобробки при відсутності обертального руху робочої камери не був безпосередньо реалізований у рамках проведеного експерименту, аналіз отриманої регресійної залежності дозволяє зробити обґрунтований висновок про більшу ефективність процесу комбінованої віброобробки порівняно з віброустановками без активного робочого органу. Зокрема, лінійний коефіцієнт при параметрі частоти обертання робочої камери у рівнянні регресії є одним із найвищих серед усіх незалежних змінних ($b_2 = 53$), що свідчить про суттєву вагу його впливу на продуктивність процесу. Водночас квадратичний коефіцієнт $b_{22} = -45$ свідчить про наявність екстремуму значення продуктивності – функція зростає при збільшенні частоти обертання камери до певного максимального значення, після чого спадає, що характерно для процесів з нелінійними характеристиками.

Висновок. У статті проведено дослідження шляхом планування експерименту процесу комбінованої віброабразивної на спеціально створеному обладнанні. Обґрунтовано ефективність використання сумісної дії вібраційного збурення та обертального руху робочої камери. Ефективність роботи віброзмішувача визначалась значенням питомої швидкості знімання матеріалу.

Уперше запропоновано комплексний підхід до опису процесу комбінованої віброобробки в середовищі вільних абразивів із використанням коефіцієнта ефективної взаємодії, який враховує перерозподіл кінетичної енергії частинок

Побудовані за результатами експериментальних досліджень графіки залежності питомої швидкості знімання від зміни параметрів мають виражений опуклий характер, що свідчить про наявність екстремумів продуктивності в межах досліджуваного діапазону технологічних параметрів.

З урахуванням отриманих значень питомої швидкості знімання матеріалу за різних режимів роботи встановлено, що раціональний режим роботи при оптимальних параметрах віброзмішувача забезпечує зростання продуктивності у 2,75 раза в порівнянні з найменш ефективним режимом роботи. При цьому подальше збільшення значень параметрів не забезпечує додаткового підвищення питомої швидкості знімання, а призводить до зниження енергоефективності процесу.

Це підтверджує актуальність підвищення ефективності комбінованого процесу віброобробки шляхом визначення оптимальних значень параметрів віброзмішувача.

Отримані результати цього дослідження із застосування активних робочих органів у віброобладнанні можуть бути використані при модернізації існуючого устаткування та створюють умови для підвищення технологічної гнучкості процесів віброобробки, формують наукове підґрунтя для створення нових комбінованих віброустановок із керованими параметрами.

Список використаних джерел

1. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. (2011). Керовані вібраційні технологічні машини : монографія. Вінниця : ВНАУ, 355 с.

2. Buhrov, D. (2024). Analysis of research and modern modeling methods for vibratory abrasive processing of parts. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (5), 78–82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.
3. Берник П. С., Ярошенко Л. В. (1998). Вібраційні технологічні машини з просторовими коливаннями робочих органів. Вінниця, 116 с.
4. Hashimoto, F., Johnson, S. P., & Chaudhari, R. G. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(1), 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>.
5. Domblesky, J. P., Evans, C. J., & Evans, J. W. (2006). A process model for surface material removal in vibratory bowls. In *SUR/FIN Proceedings* (pp. 81–84). National Association for Surface Finishing.
6. Wan, S., Liu, Y., Woon, K. S., & Tnay, G. L. (2014). A material removal and surface roughness evolution model for loose abrasive polishing of free form surfaces. *International Journal of Abrasive Technology*, 6(4), 269. <https://doi.org/10.1504/ijat.2014.065828>.
7. Liu, W., Wang, S., Jiang, Q., Morgan, M., & Liu, X. (2022). Study on the motion characteristics of abrasive media in vibratory finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2198(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012035>.
8. Zhyhylii, S., Kharchenko, M., & Katella, J. (2018). Mathematical model of the dynamic action of the controlled vibration exciter on the processed medium of mixer with toroidal working container. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 478. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14576>.
9. Жигилій, С. М., & Дяченко, К. С. (2012). Дослідження динаміки дебалансного вала керованого вібробуджувача УВВ-03. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво*, (2), 186–193.
10. Коробко, Б. О., & Бугров, Д. Ю. (2024). Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(112), 78–82 <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1-1>

References

1. Chubik R. V., Yaroshenko L. V. (2011). *Kerovani vibratsiyni tekhnolohichni mashyny. [Controlled vibrational technological machines]*. VNAU.
2. Buhrov D. (2024). Analiz doslidzhen ta suchasnykh metodiv modeliuvannia protsesiv vibroabrazivnoi obrobky detaliv. [Analysis of research and modern modeling methods for vibratory abrasive processing of parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 5, 78–82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.
3. Bernyk, P. S., Yaroshenko, L. V. (1998). *Vibratsiyni tekhnolohichni mashyny z prostorovymy kolyvanniam y robochyykh orhaniv [Vibrational technological machines with spatial oscillations of working bodies]*.
4. Hashimoto, F., Johnson, S. P., Chaudhari, R. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65, 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>
5. Domblesky, J. P., Evans, C. J., & Evans, J. W. (2006). A process model for surface material removal in vibratory bowls. In *SUR/FIN Proceedings* (pp. 81–84). National Association for Surface Finishing.
6. Stephen W, Yuchan L, Keng Soon W, Guan Leong T (2014) A material removal and surface roughness evolution model for loose abrasive polishing of free form surfaces. *International Journal of Abrasive Technology*, 6(4), 269–285. <https://doi.org/10.1504/IJAT.2014.065828>.
7. Liu, W., Wang, S., Jiang, Q. et al. (2022). Study on the motion characteristics of abrasive media in vibratory finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2198, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012035>.
8. Zhyhylii, S., Kharchenko, M., & Katella, J. (2018). Mathematical model of the dynamic action of the controlled vibration exciter on the processed medium of mixer with toroidal working container. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 478–485. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14576>.

9. Zhygillii, S. M., & Dyachenko, K. S. (2012). Doslidzhennia dynamiky debalansnoho vala kerovanoho vibrozbudzhuvacha UVV-03. [Investigation of the dynamics of the unbalanced shaft of the controlled vibration exciter UVV-03.] *Zbirnyk naukovykh prats [Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka]. Ser.: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Collection of Scientific Works. Series: Industry Engineering, Construction, Poltava National Technical University*, 2(32), 159-164.

10. Korobko B., Buhrov D. (2024). Rozrobka konstruktsii ustanovky dlia vibroabrazyvnoi obrobky poverkhon dekoratyvnykh elementiv z aktyvnym robochym orhanom [Development of a setup for vibratory abrasive treatment of surfaces of decorative elements with an active working tool]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in engineering and technology*, 1(112), 5-10. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1>.

Отримано 07.05.2025

UDC 621.9.048.6

Dmytro Buhrov¹, Bogdan Korobko²

¹PhD Student, Department of Branch Machinery and Mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: bugrov.dmitriy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4571-5147>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Branch Machinery and Mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: korobko@nupp.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>. Scopus Author ID: 57190423064

INVESTIGATION OF COMBINED VIBRATORY-ABRASIVE TREATMENT IN VIBRATORY MIXING SYSTEM WITH AN ACTIVE WORKING ELEMENT

The article presents the results of the experimental study of the vibratory-abrasive processing of decorative elements carried out in the combined-action machine that simultaneously generates controllable vibrational and rotational effects on the medium within the working chamber. This processing approach enables optimization of interaction conditions between free abrasive media and processed parts by increasing contact interaction forces through the additional force generated by rotation of the active working element.

To perform the experimental investigation, a new design of the combined vibratory machine was specially developed and manufactured. The shape, material, and quantitative ratio of tumbling media and processed parts within the working medium were selected and optimized. The main variable factors of the process were identified as the amplitude of vibration, the rotational speed of the working chamber, and the mass of the media loaded into the chamber.

To study the impact of these factors on the efficiency of the processing, the second-order three-factor experiment was designed and conducted, with systematic variation in the levels of each factor according to the experimental plan. The specific material removal rate from the surface of the parts was adopted as the quantitative efficiency criterion.

The experimental data were processed using statistical methods, and a regression model was constructed to define functional dependence of the specific material removal rate on the key process parameters. This enables predictive evaluation of process performance. Available optimal operating modes of the machine has been confirmed, which ensure the highest process efficiency with optimal energy consumption.

The experimental methodology presented in this article can be applied to optimize technological regimes of newly developed or modernized vibratory equipment designs with active working elements, aimed at creating energy-efficient solutions in the field of vibratory-abrasive surface treatment.

Keywords: vibro-abrasive treatment; rotary chamber; active working element; effective interaction coefficient; energy efficiency.

Fig.: 7. Table: 3 References: 10.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-128-136](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-128-136)

УДК 621.7

**Вадим Анатолійович Пронін¹, Олександр Анатолійович Охріменко²,
Діана Геннадіївна Музичка³**

¹аспірант кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)

E-mail: proninvadym@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7663-1778>. **ResearcherID:** [NJR-3677-2025](https://orcid.org/NJR-3677-2025)²доктор 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>. **ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/M-2462-2017)³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудівних технологій та інженерії

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

E-mail: diana_m@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>. **ScopusID:** [57205359480](https://orcid.org/57205359480)

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ТАГУЧІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РОЗШАРУВАННЯ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ СКЛОПЛАСТИКУ

У статті розглянуто оптимізацію параметрів фрезерування пултрузійного склопластику з метою зниження розшарування матеріалу. На основі методу Тагучі застосовано показник сигнал/шум для оцінки стабільності процесу, а також проведено дисперсійний аналіз для визначення значущості впливу факторів. Проведено чисельне моделювання за допомогою методу скінченних елементів для підтвердження результатів. Отримані дані дозволяють визначити оптимальні режими обробки для мінімізації дефектів деламінації.

Ключові слова: метод Тагучі; оброблення пултрузійного склопластику; коефіцієнт розшарування; коефіцієнт сигнал/шум; ANOVA.

Рис.: 2. Табл.: 2. Бібл.: 15.

Актуальність теми дослідження. Пултрузійні композити, зокрема склопластик на основі скловолокна та полімерної матриці, набули широкого застосування в авіації, енергетиці, будівництві та транспорті завдяки поєднанню високої питомої міцності, корозійної стійкості та низької густини. Технологія пултрузії забезпечує виготовлення профілів складної геометрії з постійним поперечним перерізом, що дає змогу реалізовувати несучі елементи для відповідальних конструкцій.

Постановка проблеми. Однак подальша механічна обробка таких матеріалів, зокрема фрезерування, ускладнюється анізотропною природою композиту та схильністю до виникнення дефектів, серед яких найбільш критичним є розшарування (деламінація). Розшарування порушує цілісність матеріалу на міжшаровому рівні, що суттєво погіршує експлуатаційні характеристики — міцність, жорсткість і термін служби виробу. З огляду на зазначене є потреба в точному підборі параметрів фрезерування, які дозволяють мінімізувати появу таких дефектів. У традиційних підходах це потребує проведення значної кількості дослідів, що є ресурсозатратним процесом. У зв'язку з цим метод Тагучі — інструмент статистичного планування експериментів — набуває особливого значення. Його застосування дозволяє ефективно визначити вплив численних факторів на якість обробки за обмеженої кількості випробувань, забезпечуючи статистично обґрунтовані висновки.

Ключовим завданням є визначення оптимальних режимів фрезерування пултрузійного склопластику з урахуванням таких параметрів, як швидкість різання, подача, глибина обробки та тип інструменту. Основним критерієм оцінки якості обрано коефіцієнт розшарування, а також використано аналіз відношення сигнал/шум та дисперсійний аналіз (ANOVA) для виявлення впливових факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод Тагучі широко використовується в галузі обробки композиційних матеріалів завдяки здатності виявляти критичні параметри процесу при мінімальній кількості експериментів. Його ефективність особливо проявляється при оптимізації режимів механічної обробки полімерних композитів, де типові дефекти, зокрема розшарування, значно впливають на механічну цілісність виробів.

У дослідженні [7] автори проаналізували процес фрезерування пултрузійного склопластику з метою зниження рівня міжшарового розшарування. За допомогою ортогональної матриці L18 було здійснено серію експериментів із варіюванням таких параметрів, як швидкість різання, подача на зуб, глибина обробки та тип покриття інструмента. Отримані результати свідчать про те, що найсуттєвіший вплив на рівень дефектності має подача на зуб, тоді як тип покриття ріжучого інструмента відіграє другорядну роль.

Інше дослідження [8] зосереджувалося на процесі свердління композитів, армованих вуглецевим волокном (CFRP). Метою роботи було зменшення розшарування при виході свердла, що є типовою проблемою при обробці таких матеріалів. Метод Тагучі було застосовано для вивчення впливу різних типів свердел та параметрів різання. Зокрема, було встановлено, що застосування свердел зі спеціальною геометрією значно знижує силу різання та інтенсивність деламінації при дотриманні оптимального співвідношення швидкості та подачі.

У третьому дослідженні [9], присвяченому обробці склопластику (GFRP), основна увага приділялась фрезеруванню за змінних технологічних параметрів. Автори використали матрицю L18 для вивчення впливу кількох факторів, включаючи частоту обертання, глибину фрезерування та подачу на зуб. Було з'ясовано, що зростання подачі призводить до підвищення рівня розшарування, що пов'язано з підвищеним навантаженням на міжволоконну зону композиту. Водночас оптимізація параметрів дозволила досягти прийнятної якості поверхні без значного збільшення часу обробки.

Узагальнюючи ці приклади, можна стверджувати, що метод Тагучі є потужним інструментом для покращення якості механічної обробки композитів різного складу. Його застосування забезпечує скорочення кількості експериментів, зменшення варіацій у якості обробки та підвищення надійності результатів шляхом статистично обґрунтованої оптимізації технологічних режимів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Відсутність чітких критеріїв для оцінки величини розшарування, а також встановлених залежностей між режимами оброблення і рівнем розшарування ускладнює автоматизацію процесу та змушує вдаватися до пошукових експериментів на етапі проєктування технології. Щоб уникнути дефектів, зазвичай застосовують щадні режими різання, що призводить до зниження продуктивності оброблення і, як наслідок, до підвищення собівартості виробу.

Метою статті. Метою цього дослідження є визначення ефективних режимів фрезерування пултрузійного склопластику, які дозволяють мінімізувати утворення розшарувань, з використанням методу Тагучі як інструменту статистичного аналізу та оптимізації. Для досягнення поставленої мети здійснено огляд наукових джерел, що стосуються обробки композитів, а також проаналізовано технологічні параметри, які потенційно впливають на якість обробленої поверхні. На основі обраних факторів, таких як швидкість різання, подача, глибина обробки та тип інструментального покриття, було сформовано експериментальний план з використанням ортогональної матриці L18.

Подальша обробка результатів включала розрахунок коефіцієнта сигнал/шум для оцінки стабільності процесу та дисперсійний аналіз (ANOVA) для встановлення ступеня впливу кожного фактору. Для підтвердження отриманих результатів застосовано чисельне моделювання методом скінченних елементів. Завершальним етапом дослідження стало порівняння теоретичних даних із експериментальними результатами з метою перевірки точності та ефективності оптимізованих режимів фрезерування.

Виклад основного матеріалу. Метод Тагучі, розроблений японським інженером Генічі Тагучі, є ефективним статистичним підходом до оптимізації технологічних процесів, спрямованим на підвищення якості продукції та зменшення варіацій у виробництві. Основна ідея методу полягає в тому, що якість продукції слід забезпечувати ще на етапі проєктування, а не лише шляхом контролю готової продукції [1].

Ортогональні матриці. Центральним елементом методу Тагучі є використання ортогональних матриць, які дозволяють ефективно планувати експерименти з великою кількістю факторів при мінімальній кількості випробувань. Ортогональні матриці забезпечують збалансоване поєднання рівнів факторів, що дозволяє незалежно оцінити вплив кожного з них на вихідний параметр [2]. Наприклад, матриця L18 дозволяє дослідити до 8 факторів з різною кількістю рівнів, що значно зменшує кількість необхідних експериментів порівняно з повним факторним планом [3].

Відношення сигнал/шум (S/N). Ще одним ключовим поняттям методу Тагучі є коефіцієнт сигнал/шум (S/N), який використовується для оцінки стабільності процесу та його чутливості до неконтрольованих факторів (шумів) [4]. Залежно від мети експерименту, застосовуються різні типи S/N коефіцієнтів:

"Більше – краще": використовується, коли бажано максимізувати вихідний параметр.

"Менше – краще": застосовується для мінімізації небажаних ефектів, таких як дефекти або відхилення.

"Номінальне – найкраще": використовується, коли важливо досягти певного цільового значення параметра.

Розрахунок S/N коефіцієнта дозволяє визначити оптимальні умови процесу, які забезпечують мінімальну варіацію результатів при впливі шумових факторів.

Функція втрат Тагучі. Тагучі також запропонував концепцію функції втрат, яка кількісно оцінює втрати якості продукції при відхиленні параметра від номінального значення. На відміну від традиційного підходу, де вважається, що продукція в межах допусків є якісною, функція втрат Тагучі передбачає, що будь-яке відхилення від цільового значення призводить до певних втрат [1]. Це стимулює досягнення максимальної точності у виробництві та зменшення варіацій.

Переваги та обмеження методу. Метод Тагучі має певні переваги, серед яких: зменшення кількості необхідних експериментів; можливість одночасного аналізу декількох факторів; підвищення стабільності та якості процесу.

Однак, існують і певні обмеження, такі як складність врахування взаємодій між факторами при використанні насичених ортогональних матриць. У таких випадках може бути доцільним застосування інших методів, наприклад, методу поверхні відгуку (RSM), для більш детального аналізу складних взаємодій [6].

Оцінка стабільності та надійності процесу фрезерування пултрузійного склопластику здійснюється шляхом розрахунку коефіцієнта сигнал/шум (Signal-to-Noise, S/N), що є фундаментальним елементом у структурі методу Тагучі. Цей коефіцієнт дозволяє не лише аналізувати середнє значення досліджуваного параметра, а і враховувати розсіювання результатів під впливом випадкових зовнішніх чинників, тобто шумів [3].

Оскільки головною метою дослідження є мінімізація коефіцієнта розшарування, обрано критерій типу "менше — краще", що математично описується такою формулою:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

де n – кількість вимірювань для кожного експериментального набору параметрів,

y_i – відповідне значення коефіцієнта розшарування у i -му вимірюванні [3].

Цей показник використовується для кількісної оцінки чутливості процесу до змін входних параметрів. Вищий рівень S/N свідчить про стабільніший процес з меншою варіативністю результатів. Після обчислення значень S/N для всіх експериментальних комбінацій, проводиться порівняльний аналіз середніх значень по кожному рівню технологічного фактору.

Будуються графіки головних ефектів, на яких по горизонтальній осі відкладаються рівні параметрів, а по вертикальній – відповідні середні значення коефіцієнта S/N. Чим більш виражена зміна на графіку для певного фактора, тим сильніше його вплив на цільову функцію. Такий візуальний аналіз дозволяє швидко й наочно ідентифікувати найбільш критичні параметри [10].

Для посилення надійності отриманих висновків виконується дисперсійний аналіз (ANOVA), що дає змогу визначити, яка частка загальної варіації результату зумовлена кожним із технологічних факторів. Метод ANOVA також дозволяє встановити статистичну значущість впливу кожного параметра через розрахунок F-критерію та відповідних р-значень [11].

У результаті такого багаторівневого аналізу формуються висновки щодо оптимальних технологічних режимів, які забезпечують не лише найменше розшарування при фрезеруванні пултрузійного склопластику, але й найвищу стабільність процесу.

Представлене співвідношення між рівнями основних технологічних факторів та відповідними значеннями коефіцієнта сигнал/шум (S/N), що дозволяє проаналізувати чутливість кожного параметра до змін у процесі фрезерування. Результати аналізу свідчать, що найбільш вагомий вплив на зменшення розшарування спостерігається саме при зміні подачі на зуб. Цей параметр суттєво впливає на динамічне навантаження в зоні різання, що, у свою чергу, визначає рівень міжшарових дефектів у композиті.

Швидкість різання та глибина обробки також чинять вплив на коефіцієнт розшарування, проте менш виражений у порівнянні з подачею. Що стосується типу інструментального покриття, то його вплив є найменш істотним серед досліджених параметрів. Це свідчить про відносну незалежність процесу розшарування від типу твердосплавного покриття в умовах даних експериментів.

Таким чином, використання графічного аналізу S/N дозволяє ідентифікувати критичні змінні, оптимізація яких є ключем до зменшення дефектів у пултрузійному склопластику. Отримані результати створюють передумови для розробки ефективних режимів обробки, орієнтованих на досягнення високої якості фрезерованої поверхні.

Дисперсійний аналіз (ANOVA) дозволяє кількісно оцінити внесок кожного фактора у загальну варіацію коефіцієнта розшарування. У табл. 1 наведено значення F-критерію та p-value для кожного фактора, а також відсотковий внесок у загальну варіацію.

Таблиця 1 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA)

Фактор	Ступені свободи (DOF)	Сума квадратів (SS)	Середній квадрат (MS)	F-критерій	p-value	Внесок, %
Подача на зуб (f)	2	0,038	0,019	12,67	0,004	62,3
Швидкість різання (V)	2	0,015	0,0075	5,00	0,037	24,6
Глибина різання (t)	1	0,004	0,0040	2,67	0,118	6,6
Тип інструменту	1	0,002	0,0020	1,33	0,248	3,3
Похибка (Error)	11	0,0165	0,0015	–	–	3,2
Загалом	17	0,0755	–	–	–	100,0

Джерело: розроблено авторами.

Результати дисперсійного аналізу (ANOVA). Для визначення впливу кожного з досліджуваних технологічних параметрів на рівень розшарування пултрузійного склопластику був застосований дисперсійний аналіз (ANOVA), що є одним із найпоширеніших статистичних інструментів у методології планування експериментів [11]. Метод ANOVA дозволяє встановити не лише ступінь впливу кожного фактора на загальну варіацію результатів, а й перевірити статистичну значущість цього впливу за допомогою р-значення та F-критерію [12].

У ході аналізу було виявлено, що найвагоміший вплив має подача на зуб, яка забезпечує понад 60 % внеску в загальну дисперсію. При цьому її p-value становить менше ніж 0,05, що підтверджує статистично значущий вплив цього параметра. Швидкість різання виявила помірний ефект (близько 25 % внеску), тоді як глибина різання та тип інструменту мали відносно незначний вплив із часткою не більше 10 % кожен [1].

Результати аналізу наведено в табл. 1, де також представлено кількісні характеристики кожного параметра: кількість ступенів свободи, сума квадратів, середній квадрат, значення F-критерію, p-value та відсотковий внесок у дисперсію. Ці дані дозволяють сформувати обґрунтовані висновки щодо подальшої оптимізації режимів обробки.

Умови експерименту. Для експерименту як заготовку було обрано склопластиковий швелер перерізом $100 \times 50 \times 6$ виготовлений методом пултрузії. Експеримент проводили, використовуючи твердосплавну чотириризбну фрезу з покриттям TiN, діаметр фрези 6 мм.

Режими різання застосовувались у таких діапазонах:

- глибина різання $a_p = 5$ мм та $a_p = 10$ мм;
- подача на зуб $f_z = 0,04, 0,06, 0,08$ мм/зуб;
- швидкість різання $V = 80, 100, 120$ м/хв.



а



б

Рис. 1. Заготовка швелера з пултрузійного склопластику (а), інструмент, що використовувався при обробці, фреза твердосплавна $d = 6$ мм, $z = 4$ (б)
Джерело: розроблено авторами.

Теоретичний розрахунок коефіцієнта розшарування. Для теоретичного визначення коефіцієнта розшарування пултрузійного склопластику при фрезеруванні використано кілька математичних моделей. Основна увага приділяється двом підходам:

Емпірична модель, розроблена на основі власного експерименту:

$$Fd = 6,07866 + 3,0495 \cdot f + 2,36542 \cdot a_p - 1,87488 \cdot \frac{V}{100} \quad (2)$$

Модель Davim (узагальнена літературна модель) [13]:

$$Fd = 5,0 + 2,5 \cdot f + 1,5 \cdot a_p - 1,2 \cdot \frac{V}{100} \quad (3)$$

Модель Praveen Raj & Elaya Perumal [14]:

$$Fd = 1,18 + 0,00107 \cdot V + 0,086 \cdot f + 0,0513 \cdot a_p \quad (4)$$

Модель IOSR [15]:

$$Fd = 0,959 + 0,00103 \cdot 30 - 0,000001 \cdot 2000 + 0,272 \cdot (f \cdot 1000) \quad (5)$$

де V – швидкість різання, м/хв;

f_z – подача на зуб, мм/зуб;

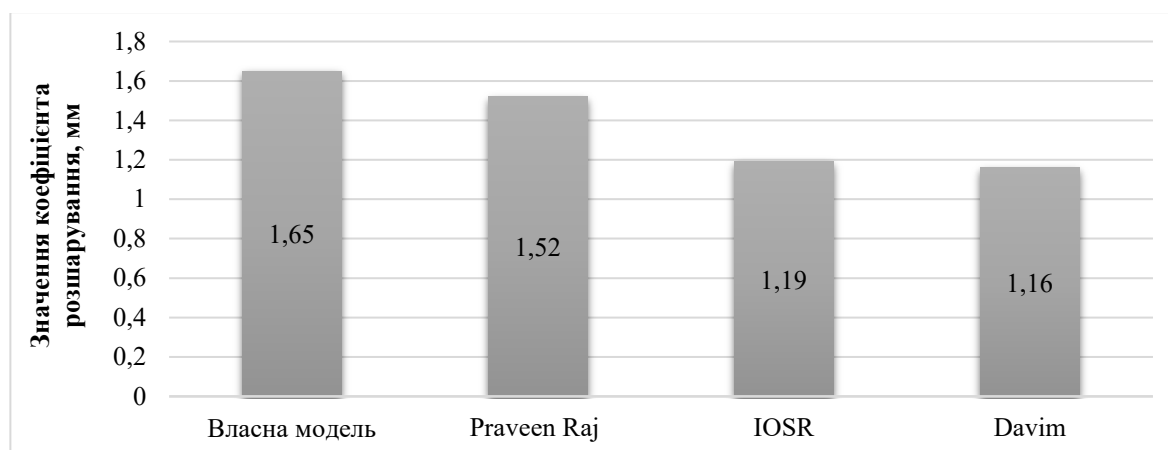
a_p – глибина різання, мм.

Розрахунок здійснено для кожної комбінації технологічних параметрів згідно з ортогональною матрицею L18. Отримані результати дозволяють порівняти теоретичні значення коефіцієнта розшарування за різними підходами та провести подальшу верифікацію з практичними даними (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця коефіцієнтів розширування

V(м/хв)	f_z (мм/зуб)	a_p (мм)	Fd (власна модель)	Fd (Davim)	Fd (Praveen)	Fd (IOSR)
80,0	0,04	5,0	1,65	1,16	1,52	1,19
80,0	0,04	10,0	1,84	1,91	1,78	1,19
80,0	0,06	5,0	1,66	1,17	1,52	1,73
80,0	0,06	10,0	1,84	1,92	1,78	1,73
80,0	0,08	5,0	1,66	1,17	1,52	2,27
80,0	0,08	10,0	1,85	1,92	1,78	2,27
100,0	0,04	5,0	1,62	1,14	1,54	1,19
100,0	0,04	10,0	1,8	1,89	1,80	1,19
100,0	0,06	5,0	1,62	1,15	1,54	1,73
100,0	0,06	10,0	1,8	1,9	1,80	1,73
100,0	0,08	5,0	1,63	1,15	1,55	2,27
100,0	0,08	10,0	1,81	1,9	1,80	2,27
120,0	0,04	5,0	1,58	1,12	1,56	1,19
120,0	0,04	10,0	1,76	1,87	1,82	1,19
120,0	0,06	5,0	1,58	1,12	1,57	1,73
120,0	0,06	10,0	1,77	1,87	1,82	1,73
120,0	0,08	5,0	1,59	1,13	1,57	2,27
120,0	0,08	10,0	1,77	1,88	1,82	2,27

Джерело: розроблено авторами.

Рис. 2. Порівняння математичних моделей для визначення коефіцієнта розширування для наступних значень режимів різання: $V = 80$ м/хв, $f_z = 0,04$ мм/зуб, $a_p = 5$ мм

Джерело: розроблено авторами.

Проведене порівняння чотирьох математичних моделей для оцінки коефіцієнта розширення при фрезеруванні пултрузійного склопластику показало відмінності в числових прогнозах, проте загальні тренди залишаються узгодженими. Для вибраної комбінації технологічних параметрів ($V = 80$ м/хв, $f_z = 0,04$ мм/зуб, $a_p = 5$ мм) були отримані такі значення:

За власною моделлю: $Fd \approx 1,65$.За моделлю Praveen Raj & Elaya Perumal: $Fd \approx 1,52$.За моделлю Davim: $Fd \approx 1,16$.За моделлю IOSR: $Fd \approx 1,19$.

Найвищий прогнозований коефіцієнт розширування дає власна емпірична модель, що може свідчити про її високу чутливість до особливостей обробки саме пултрузійних композитів. Моделі Davim та IOSR демонструють дуже близькі результати, що підтверджує їхню узагальненість і придатність для базового аналітичного аналізу.

Таким чином, усі чотири моделі показують логічну тенденцію з точки зору впливу технологічних параметрів. При цьому, вибір конкретної моделі для інженерних застосувань має базуватись на ступені відповідності умовам виробництва.

Висновок. Здійснений аналіз теоретичних моделей розрахунку коефіцієнта розшарування дозволив всебічно оцінити вплив технологічних параметрів фрезерування пултрузійного склопластику на формування міжшарових дефектів. Отримані результати вказують на суттєві розбіжності між прогнозами, що генеруються різними математичними підходами. Найвищі значення коефіцієнта розшарування демонструє власна емпірична модель, створена на основі обробки експериментальних даних, що свідчить про її високу чутливість до змін подачі, глибини різання та швидкості різання в умовах обробки саме пултрузійного композиту.

Моделі Davim і IOSR показали схожі результати, що підкреслює їх узагальненість і потенційну придатність для початкової оцінки якості обробки. Водночас модель Praveen Raj дала найнижче значення коефіцієнта розшарування, що, ймовірно, пов'язано з відмінністю умов експерименту, типом інструменту та специфікою композиту, який досліджувався в оригінальній роботі.

Такий порівняльний підхід є надзвичайно корисним з погляду верифікації моделей: він дозволяє не лише обрати найбільш релевантну формулу для прогнозування якості обробки, але й виявити потребу в коригуванні коефіцієнтів під конкретні виробничі умови. На практиці це дозволяє мінімізувати кількість експериментів при впровадженні нового технологічного режиму та покращити прогнозованість результатів.

Додатково, отримані результати можуть бути використані як основа для подальшої оптимізації процесу шляхом впровадження адаптивних систем контролю фрезерування, які автоматично коригують режими різання на основі математичних моделей. Це особливо актуально для обробки сучасних високовартісних композитів, де навіть незначне розшарування може призвести до браку чи зниження ресурсу деталі.

Таким чином, системне використання математичних моделей у поєднанні з експериментальними перевірками створює надійну основу для побудови інженерно обґрунтованої стратегії обробки пултрузійних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Taguchi, G. (1987). *Taguchi methods: Design of experiments*. ASI Press.
2. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
3. Peace, M. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Addison-Wesley.
4. Palanisamy, S., & Kalimuthu, M. (2016). Fabrication and testing analysis of natural fibre composite materials. *IEEE Transactions on Composites*, 5, 285–288.
5. Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw-Hill.
6. Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Wiley.
7. Davim, J. P., & Reis, P. (2004). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289–297. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X).
8. Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10), 1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.019>.
9. Shinde, S., Mane, S., & Patil, S. (2018). Optimization of process parameters in milling of GFRP composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.104>.
10. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
11. Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Wiley.
12. Roy, R. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons.
13. Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., Shandilya, M., & Jayachandran, K. (2022). Revised adjusted factor for delamination measurement in drilling of fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Science and Technology*, 12(1), 32–42.

14. Praveen Raj, P., & Elaya Perumal, A. (2013). Prediction of delamination in end milling of GFRP using ANSYS. *Applied Journal of Science and Technology for Professional Mechanical Engineers*, 6(2), 39–46.
15. Aadeputu, S., Lachiram, D., & Ramesh Babu, P. (2023). Techniques for strengthening, suppressing delamination, and preventing delamination formation during the drilling of CFRP composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 20(2), 7–15.

References

1. Taguchi, G. (1987). *Taguchi methods: Design of experiments*. ASI Press.
2. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
3. Peace, M. (1993). *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Addison-Wesley.
4. Palanisamy, S., & Kalimuthu, M. (2016). Fabrication and testing analysis of natural fibre composite materials. *IEEE Transactions on Composites*, 5, 285–288.
5. Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering*. McGraw-Hill.
6. Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments* (8th ed.). Wiley.
7. Davim, J. P., & Reis, P. (2004). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composites Science and Technology*, 64(2), 289–297. [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00257-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00257-X).
8. Tsao, C. C., & Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(10), 1085–1090. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.019>.
9. Shinde, S., Mane, S., & Patil, S. (2018). Optimization of process parameters in milling of GFRP composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 672–678. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.104>.
10. Roy, R. (2010). *A primer on the Taguchi method*. Society of Manufacturing Engineers.
11. Montgomery, D. C. (2012). *Design and Analysis of Experiments* (8th ed.). Wiley.
12. Roy, R. (2001). *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons.
13. Bhat, R., Mohan, N., Sharma, S., Shandilya, M., & Jayachandran, K. (2022). Revised adjusted factor for delamination measurement in drilling of fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Composite Science and Technology*, 12(1), 32–42.
14. Praveen Raj, P., & Elaya Perumal, A. (2013). Prediction of delamination in end milling of GFRP using ANSYS. *Applied Journal of Science and Technology for Professional Mechanical Engineers*, 6(2), 39–46.
15. Aadeputu, S., Lachiram, D., & Ramesh Babu, P. (2023). Techniques for strengthening, suppressing delamination, and preventing delamination formation during the drilling of CFRP composites. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 20(2), 7–15.

Отримано 30.05.2025

UDC 621.7

Vadym Pronin¹, Oleksandr Okhrimenko², Diana Muzychka³

¹PhD student, Department of Mechanical Engineering

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: proninvadym@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-7663-1778>. **ResearcherID:** [NJR-3677-2025](https://orcid.org/0009-0005-7663-1778)

²Doctor 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>. **ResearcherID:** [M-2462-2017](https://orcid.org/0000-0002-5446-6987)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Manufacturing Technologies and Engineering

Dniprovsky State Technical University (Kamianske, Ukraine)

E-mail: diana_m@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2914-9672>. **ScopusID:** [57205359480](https://orcid.org/0000-0002-2914-9672)

APPLICATION OF THE TAGUCHI METHOD FOR EVALUATING DELAMINATION DURING THE MACHINING OF FIBERGLASS

In the article, application of the Taguchi method for optimizing the milling parameters of pultruded fiberglass composites to reduce material delamination is examined. Key technological factors influencing machining quality are identified, namely: cutting speed, feed per tooth, depth of cut, and tool coating type. The L18 orthogonal array was employed for effective experimental design. The delamination factor was calculated using Chen's empirical formula. The signal-to-noise ratio was applied

to assess process stability, and the analysis of variance (ANOVA) was conducted to determine significance of each factor's influence. Numerical modeling based on the finite element method (FEM) was performed to validate the results.

For the experiment, the pultruded fiberglass channel section of $100 \times 50 \times 6$ mm was used as the workpiece. The machining tests were conducted with a four-flute solid carbide end mill with TiN coating, diameter 6 mm. Cutting parameters were varied within the following ranges: depth of cut (a_p): 5 and 10 mm; feed per tooth (f_z): 0.04, 0.06, 0.08 mm/tooth; cutting speed (V): 80, 100, and 120 m/min. The obtained data enable identification of optimal machining parameters to minimize delamination defects. The research results can be applied in industrial processing of composite materials where high precision and reliability are required.

The analysis of theoretical models for calculating delamination factor provided a comprehensive assessment of the influence of milling parameters on formation of interlaminar defects in pultruded fiberglass composites. The obtained results reveal significant discrepancies between predictions generated by different mathematical approaches. The highest delamination factor values were observed with the proprietary empirical model, developed based on experimental data processing, indicating its high sensitivity to variations in feed rate, depth of cut, and cutting speed under the specific conditions of pultruded composite machining.

Keywords: milling of composite materials; delamination factor; machining of pultruded fiberglass composites; Taguchi method; orthogonal array; signal-to-noise ratio; ANOVA; composite machining.

Fig.: 2. Table: 2. References: 15.

**Oleksandr Yevdokymov¹, Vitalii Kolesnyk², Andriy Dovhopolov³,
Mykola Bykov⁴, Denys Fesenko⁵**

¹PhD 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>

²PhD 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>

³PhD in Technical Sciences,

Senior lecturer of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

⁴PhD Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine), NGO Industry 5.UA (Sumy, Ukraine)

E-mail: m.bykov@tmvi.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-0912-7496>

⁵PhD Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools
Sumy State University (Sumy, Ukraine), NGO Industry 5.UA (Sumy, Ukraine)

E-mail: fesenkodenys9@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-9252-0197>

INCREASING PRODUCTIVITY OF PROCESSING THE MORTAR BODY COMPONENT

Within the study, the increase in processing productivity of the mortar body part of the aerosol system AEK-902 "Tucha", is studied, which is actively used for camouflage and enhancing combat capability of military equipment and vehicles, serves as an auxiliary means for evacuation, and as a defense method against drones. Using the automated selection method, cutting tools and efficient cutting parameters were chosen for mechanical turning operations, utilizing software, including Sandvik ToolGuide, Walter GPS, and Iscar Tool Advisor. The obtained parameters were compared, the productivity was calculated using the material removal rate (MRR) method, and comparative productivity charts were created. Based on the data, recommendations for selecting cutting tools and processing parameters for specific turning operations were developed. The results are based on software recommendations and require further experimental verification in real production conditions. Verification through practical experiments will allow comparison of calculated parameters to actual processing indicators, refining the parameters and considering possible deviations. This is relevant direction for future research in automated tool selection and optimizing mechanical processing.

Keywords: turning, machining, cutting parameters, processing productivity, automated selection, cutting tool, boring.

Fig.: 4. Tables: 5. References: 12.

Relevance of the research. The use of smoke screen devices is relevant method that can be employed for camouflage. Smoke screens are widely used on various types of equipment, including Ukrainian military vehicles. Aerosols used in smoke screens provide opacity in visible, infrared, and radar (millimeter wave) ranges and absorb laser radiation to counter detection systems. Application of smoke screens helps protect personnel and equipment from enemy fire, thereby preventing losses. Expanding smoke mortars could be equipped off-road vehicles widely used for troop movement or evacuation.

Target setting. Special attention is given to reliability and durability of the mortar body, as its failure could prevent deployment of the smoke screen at the critical moment. Ensuring the high quality of this part will contribute to maintaining functionality of smoke masking systems and enhancing combat capability of armored vehicles or transport. The mortar body in the launching system plays an important role, as it holds and stores the grenade before firing and directs the grenade's launch trajectory for modifications that involve firing the ammunition. Other mortar body modifications are designed for stationary launching of the smoke grenade, which can be useful in creating the smoke screen for vehicles against drones.

Actual scientific researches and issues analysis. The most widely used camouflage system in the Ukrainian Armed Forces (UAF) is the Soviet aerosol system AEK-902 "Tucha" (Ukr. "Khmara"). The system includes several launching devices (mortars), each of which is a smooth-bore grenade launcher of 81 mm caliber, with a barrel length of 270 mm and a weight of 1.35 kg.

They are mounted on the hull or turret of the armored vehicle and equipped with electric trigger for remote grenade launch. The ammunition includes smoke grenades of types 3D6, 3D6M, or 3D17, which, after being launched, create a dense smoke screen at a distance of up to 300 meters [1]. Formation of the screen takes 10–20 seconds, and its duration is about 2.5 minutes, providing effective camouflage for armored vehicles on the battlefield [2–4]. It is used both on Soviet-era vehicles in service with the Ukrainian Armed Forces (T-62, T-64, T-72, T-80 tanks, BMP-1P and BMP-2 infantry fighting vehicles), as well as on new models such as the T-84 “Oplot” tank and BTR-3 and BTR-4 “Bucephalus” armored personnel carriers. In addition, the system is installed on modernized Ukrainian BTR-80UP and BMP-1U vehicles. The use of aerosols ensures: artificial deterioration of atmospheric transparency, reduction or complete elimination of visibility, screening of thermal and visible radiation from an object, or dispersion of electromagnetic radiation [4, 6–8]. Given the widespread use of the “Tucha” system in defense forces on many types of armored vehicles, maintaining its operational effectiveness is critical for the success of combat operations [5, 9–10].

Since the part “mortar body” is made of steel 30XГСА (30KhGSA), it is essential correctly select the cutting tool and cutting modes for mechanical operations. The advantages of using this material to manufacture the mortar body are high strength, wear resistance, and the ability to withstand significant dynamic loads. Key properties of steel 30XГСА include high strength after heat treatment and good wear resistance, especially under cyclic loads, which is particularly important for the launcher guide. Steel 30XГСА is resistant to fatigue failure [11]. The disadvantages are as follows: low machinability of this steel since steel 30XГСА is prone to build-up on the cutting edge of the cutting tool and low thermal conductivity, which can lead to overheating in the cutting zone [12–13]. It has also been established that during processing of long or thin-walled parts, vibrations may occur, leading to the occurrence of traces of beating, the decrease in surface quality, and dimensional errors during the manufacture of the part or its deformation [12]. Given that the mortar body component has thin walls and, as a result, low rigidity, solving the machining problems by selecting rational cutting modes and cutting tools, taking into account processing features, is a relevant issue.

Uninvestigated parts of general matters defining. Methods for solving the above problems that arise during the machining of the “mortar body” component include using additional support devices during processing, effective cooling, special fastening methods, and rationalization of cutting modes. Given active hostilities, particularly the widespread use of military equipment equipped with this system, increasing the productivity and economic efficiency of processing is a relevant task. Cutting parameters can be rationalized by selecting the appropriate cutting tool and conditions, such as feed, depth, and cutting speed. Rational selection of modes and cutting tools, considering characteristics of the part material and its characteristics, reduces formation of growth and the risk of part deformation during machining. In addition, it contributes to increasing machining productivity, reducing the cost of the part, and improving the accuracy of the manufactured components.

The article aims to determine productive cutting conditions for machining the mortar body component through automated tool selection.

The statement of basic materials. The material used for the mortar body is steel 30XГСА, a high-strength alloy steel used in aviation (landing gear components, aircraft structural elements), mechanical engineering (axles, shafts, gears, rods, studs), and military industries (armor elements, load-bearing structures). Advantages of this steel include high strength, wear resistance, and ability to withstand significant dynamic loads. Key properties of steel 30XГСА include high strength after heat treatment, good wear resistance, especially under cyclic loads, which is particularly important for the launcher guide. The steel is sensitive to overheating and prone to temper brittleness, which is a negative factor for its use in stationary smoke grenades due to high temperature of the smoke-forming chemical reaction, which can reach 450–500°C. Steel 30XГСА is resistant to fatigue failure [11].

Alternative materials that can be used in production include steels such as 30XГТ, 40Х, 35ХГС, 40ХГС, and 15ХМ. Suitable analogs are steels like AISI 4340 and AISI 4140. Among these materials, the most appropriate substitutes for the mortar body are AISI 4340 and 40X steel, as they have similar wear resistance, which is crucial for operational conditions of the mortar body.

As a blank for the part, considering conditions of single or small-scale production, it is advisable to use standardized rolled products that are as close as possible to the shape of the part. This is best achieved with hot-deformed rolled products in a seamless steel pipe, according to DSTU 8938:2019 [12]. Dimensions of the blank are as follows: outer diameter $\varnothing 102$ mm, inner diameter $\varnothing 70$ mm, and length 214 mm. The sketch of the blank is shown in Figure 1.

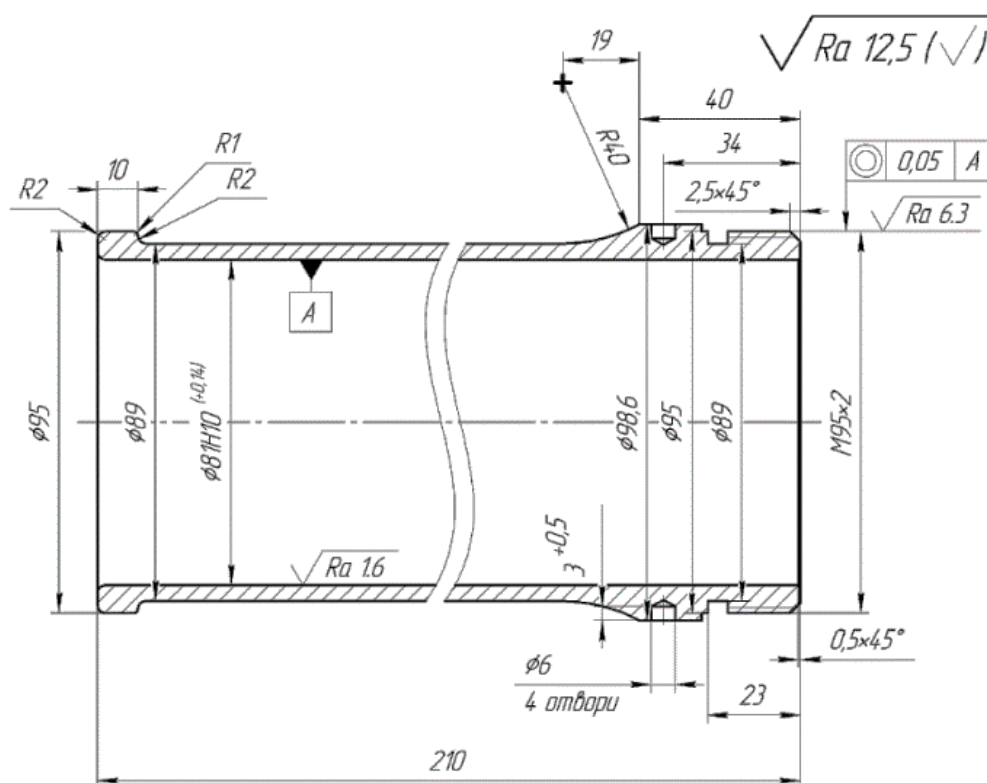


Fig. 1. Sketch of the mortar body part

The following machine specifications will be used for calculations, namely: the turning-milling machine Mazak Quick Turn 15MS, featuring a spindle speed of up to 5000 rpm, a maximum turning diameter of 300 mm, a power output of 18.5 kW, and the machining length of 508 mm. Machining conditions include the use of cutting fluids (coolants). In the respective software tools, the machine is configured according to specifications provided in the manufacturer's documentation.

Automated selection of cutting tools and machining parameters will be carried out using software products from Sandvik Coromant (ToolGuide), Walter (GPS), and Iscar (Tool Advisor) for each turning operation. The workflow of the selection process in the mentioned programs is shown in Figure 2.

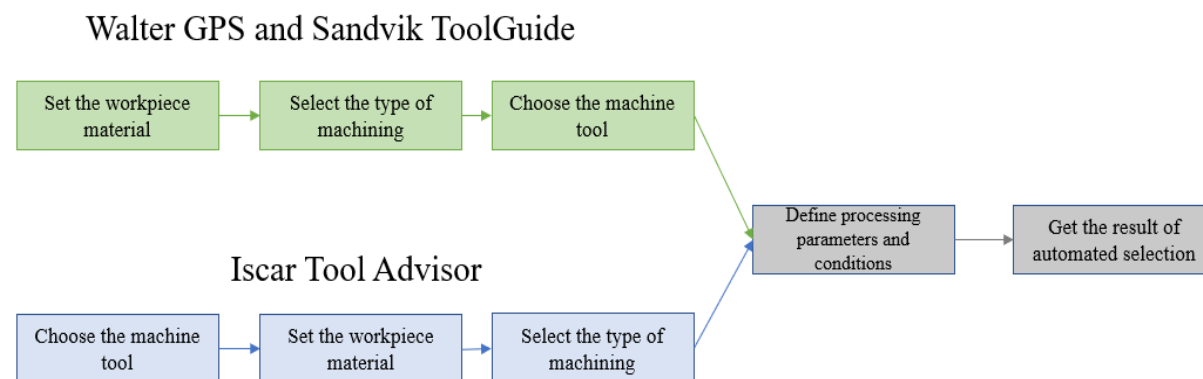


Fig. 2. Block diagram of the algorithm used in the specified programs

As shown in the block diagram in Figure 2, the algorithms used in Walter and Sandvik follow similar sequence: first, the workpiece material is selected, followed by the type of machining operation, the machine tool, and then the machining parameters and conditions are specified. The result is presented as a recommended cutting tool and cutting parameters.

Iscar follows different sequence but ultimately provides the same outcome. The step-by-step implementation of the block diagram using the Walter GPS software is illustrated in Figure 3.

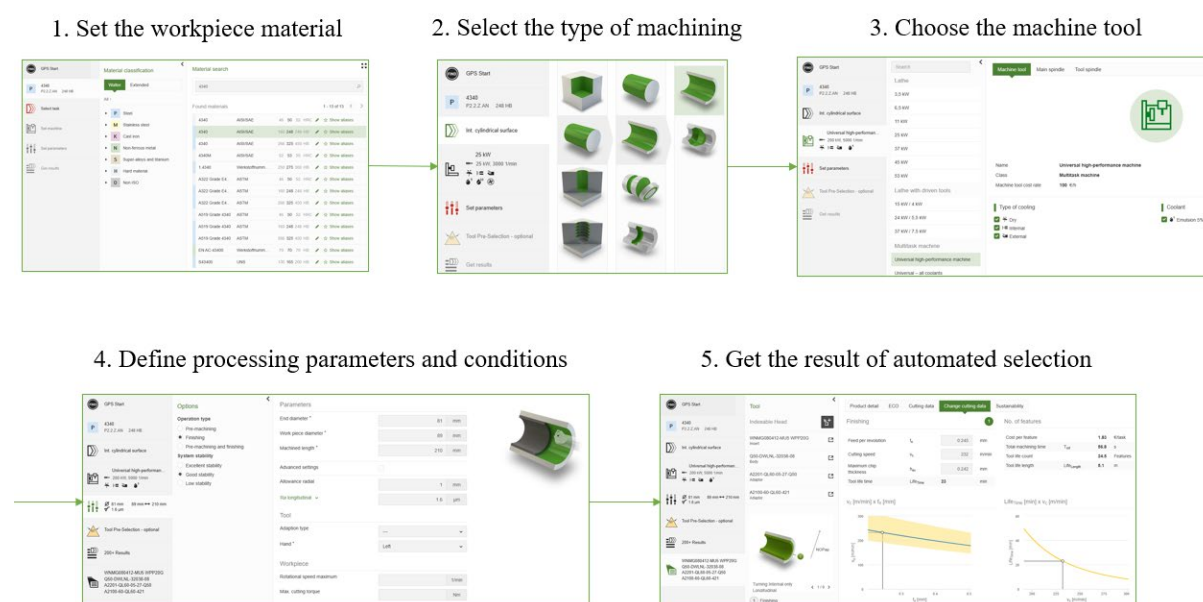


Fig. 3. Sequence of the tool selection for finish boring in the Walter GPS program

Comparing the results is carried out based on factors such as cutting speed, feed rate, depth of cut, tool life, machining time, and material removal rate (MRR). Since not all software tools calculate tool productivity in terms of the volume of material removed per minute, where necessary, the MRR is determined using the formula:

$$MRR = v_c \cdot f \cdot a_p \quad (1)$$

where v_c – cutting speed (m/min), f – feed rate (mm/rev), a_p – depth of cut (mm).

To solve the problem of low rigidity, we use appropriate settings in the software selection, for Sandvik ToolGuide we set “Poor stability”, for Walter GPS “Low stability” and for Iscar Tool Advisor “Unstable”. This will allow us to take into account the conditions of low rigidity during automated selection.

Since material 30XГCA is not available in the specified software, its equivalent, AISI 4340 steel, was used for the calculations. According to the material classification, AISI 4340 steel belongs to ISO group P7. This steel was used for all calculations across the selected software platforms.

Manufacturing the mortar body requires high precision, cutting stability, and effective tool wear management. Three leading manufacturers — Sandvik, Walter, and Iscar — were analyzed to evaluate the efficiency of different cutting tools in turning operations.

During the study, a cutting tool was selected for each mechanical turning operation using automated selection methods. The obtained results are presented in Tables 2–4. In these tables:

- i – number of passes per operation,
- a_p – depth of cut for the specified pass,
- f – feed rate (mm/rev),
- v – cutting speed (m/min),
- t – machining time per operation (seconds),
- t_{life} – tool life for the specified operation (minutes).

Table 2 summarizes the results of automated tool selection using Sandvik Coromant’s “Tool Guide” software. Sandvik’s tool demonstrated high efficiency in rough turning of the mortar body. The high cutting speed enables fast machining of the workpiece; however, the tool has a moderate tool life, which may require more frequent insert replacements. It proved especially effective in facing and rough turning operations.

Table 1 – Selection results in Sandvik ToolGuide software

№	Operation	i	a_p	f	v	t	t_{life}
005	Facing	1	2	0.707	279	4,86	20
010	Rough and finish turning	1	3,9	0.5	279	44,7	27,6
		2	2,55				
		3	2,55				
015	Rough boring	1	2,54	0,36	314	46,1	26,7
		2	1,96				
020	Facing	1	2	0,707	279	4,86	20
025	Rough and finish turning	1	3,5	0,518	173	8,16	20
		-	-	-	-	-	-
030	Rough boring	1	2,54	0,373	199	14	20
		2	1,96				
035	Milling	-	-	-	-	-	-
040	Drilling	-	-	-	-	-	-
045	Thread cutting	1	1	-	160	20,2	17,3
050	Finish boring	1	1	0,253	239	53,8	22,6

Table 3 presents the recommendations provided by Walter. The depth of cut values are similar to those recommended by Sandvik; however, the suggested cutting speeds and feed rates are lower. As a result, the machining productivity and material removal rate are reduced, negatively affecting the total machining time. On the other hand, these conditions contribute to increased tool life.

This option may be considered a compromise solution when machining time is not a critical factor in production. Still, there is a need for a more stable and consistent cutting process along with improved surface quality.

Table 2 – Selection results in Walter GPS software

№	Operation	i	a_p	F	v	t	t_{life}
005	Facing	1	2	0,44	153	14,3	23
010	Rough and finish turning	1	4	0,523	208	58	23
		2	2,5				
		3	2,5				
015	Rough boring	1	2,25	0,393	238	54	28
		2	2,25				
020	Facing	1	2	0,44	153	14,3	23
025	Rough and finish turning	1	1,8	0,564	198	14,2	23
		2	1,7	0,495	206		
030	Rough boring	1	2,25	0,393	199	13.4	23
		2	2,25				
035	Milling	-	-	-	-	-	-
040	Drilling	-	-	-	-	-	-
045	Thread cutting	1	1	-	127	15,3	19
050	Finish boring	1	1	0,245	232	56.3	23

Table 4 summarizes the results obtained from the automated selection using Iscar Tool Advisor software. It can be observed that, despite having similar depth of cut values, the cutting speeds and feed rates are the lowest among the manufacturers considered. Consequently, this has a negative impact on machining productivity and processing time. In this case, it can be concluded that the manufacturer places a greater emphasis on tool life, which is the highest compared to the other manufacturers.

Table 3 – Selection results in Iscar Tool Advisor software.

№	Operation	i	a_p	f	v	t	t_{life}
005	Facing	1	2	0,35	264	17,3	34
010	Rough and finish turning	1	4	0,28	271	125	36
		2	2,5				
		3	2,5				
015	Rough boring	1	1,5	0,17	132	334	34
		2	1,5				
		3	1,5				
020	Facing	1	2	0,35	264	14,3	34
025	Rough and finish turning	1	1,8	0,28	278	19	36
		2	1,7				
030	Rough boring	1	2,25	0,16	185	33	34
		2	2,25				
035	Milling	-	-	-	-	-	-
040	Drilling	-	-	-	-	-	-
045	Thread cutting	1	1	-	110	-	-
050	Finish boring	1	1	0,16	195	99	40

Using Equation 1 from the research methodology, the Material Removal Rate (MRR) parameter was calculated in cm^3/min . Based on the obtained calculated data, machining productivity graphs for mechanical operations were constructed (Figure 4).

The analysis of material removal volume graph emphasizes that Sandvik tool has the highest productivity in all the mentioned mechanical turning operations. The notably higher productivity is noticeable during facing operations. Walter's tool ranks second in terms of productivity. It occupies an intermediate position in terms of productivity in almost all cases, except for facing. The tool from Iscar ranks third. To systematize the obtained results, they were summarized in Table 5, which can serve as a guide when choosing a cutting tool manufacturer.

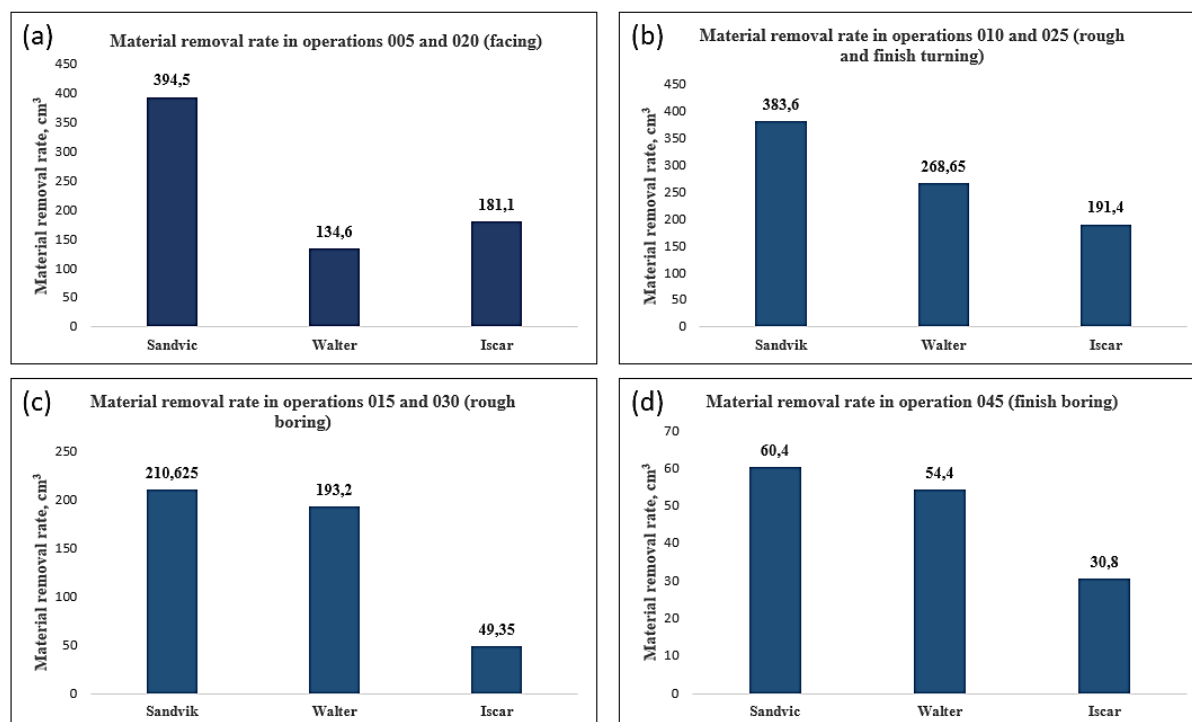


Fig. 4. Productivity charts (a) – for facing operation, (b) – for rough and finish turning, (c) – for rough boring, and (d) – for finish boring

Analyzing the manufacturers in terms of the cutting depth parameter, it was determined that the cutting depth does not differ significantly across the manufacturers. In almost all cases, the manufacturers propose the same processing strategy, which includes the same number of passes, with the cutting depth parameter varying slightly depending on the manufacturer. The only exception is operation 025, where Sandvik proposed operating one pass, while Walter and Iscar suggested two passes. At the same time, Sandvik recommends using significantly higher feed rates during processing (closer to the recommendations of Walter) and higher cutting speeds, which significantly affect the operation's productivity, as seen in graphs *a*, *b*, *c*, and *d* in Figure 4. The high speed and productivity, in turn, negatively affect the tool life. As can be seen, the tool from Sandvik has the shortest tool life, while the tools from Iscar and Walter, which operate at lower speeds, have a longer tool life. It is important to note that using tools at high speeds may lead to formation of build-up edges and premature cutting edge chipping, which can negatively affect the accuracy of the machined surface. Additionally, using lower cutting speeds helps reduce the risk of vibrations. Considering that the goal of this study is to determine productive machining modes, the Sandvik tool is the most suitable for use, as the machining time of the part will be significantly shorter compared to the others.

Table 4 – Comparative Tool Table

Parameter	Sandvik	Walter	Iscar
Cutting Depth	***	***	***
Feed	***	***	*
Cutting Speed	***	*	**
Processing Time	***	**	*
Tool Durability	**	***	***
Productivity	***	**	*

Given the results obtained for all operations, the Sandvik tool is preferred. The tool (holder, insert, adapter) selected using the automated tool selection method through the Sandvik ToolGuide program is listed in Table 5.

Table 5 – Tool Selection Recommendations

№	Operation	Toolholder	Insert	Adapter
005	Facing	DSSNL 2525M 15	SNMG 15 06 16-PR 4425	-
010	Rough and finish turning	DCLNL 2525K 15	CNMG 15 04 16-PR 4425	-
015	Rough boring	C4-570-3C 40 173	CCMT 12 04 12-PR 4425	570-SCLCL-40-12
020	Facing	DSSNL 2525M 15	SNMG 15 06 16-PR 4425	-
025	Rough and finish turning	DCLNL 2525K 15	CNMG 15 04 16-PR 4425	-
030	Rough boring	A25T-SSKCL 12	SCMT 12 04 12-PR 4335	-
045	Thread cutting	266LFA-2020-16	266LG-16MM01A200M 1125	
050	Finish boring	HT30D-CY32 320-32	DCMT 11 T3 12-PM 4335	570-SDXCL-32-11

Conclusions. This article presents the search for productive cutting conditions for the mechanical processing of the mortar casing of the smoke screen system through automated selection and analysis of cutting tools from the manufacturers Sandvik, Walter, and Iscar. The corresponding software from the manufacturers, namely Sandvik “ToolGuide,” Walter “GPS,” and Iscar “Tool Advisor,” were used for tool selection. As a result of the research, the following was determined:

- Cutting Depth – The tools from all manufacturers offer almost the same processing strategy in most cases, so the cutting depth values are similar across all manufacturers.
- Feed Rate – The tool from Sandvik suggests using higher feed rates, while Walter recommends slightly lower values. Much lower feed rates are proposed for the tool from Iscar.
- Cutting Speed – The tool from Sandvik suggests the highest values, the tool from Iscar shows intermediate cutting speed values, and Walter proposes the lowest cutting speeds.
- Processing Time – The shortest processing time is achieved with the Sandvik tool, intermediate time with Walter, and the longest machining time with Iscar.
- Tool Life – Iscar logically proposes the most extended tool life, which works with lower cutting conditions. The tool from Walter occupies the second place for tool life, and the third is Sandvik.
- Productivity – The most productive tool is from Sandvik, the second is Walter, and third is Iscar.

According to the obtained data, the recommended cutting conditions and cutting tools for turning operations are:

- 005 and 020 (Facing) – Holder DSSNL 2525M 15, insert SNMG 15 06 16-PR, cutting depth – 2 mm, feed rate – 0.707 mm/rev, cutting speed – 279 m/min.
- 010 and 025 (Rough and Finish Turning) – Holder DCLNL 2525K 15, insert CNMG 15 04 16-PR 4425, cutting depth – from 2.55 to 3.9 mm, feed rate – from 0.5 to 0.518 mm/rev, cutting speed – from 173 to 279 m/min.
- 015 and 030 (Rough Boring) – Holder C4-570-3C 40 173 (adapter 570-SCLCL-40-12) and A25T-SSKCL 12, insert CCMT 12 04 12-PR 4425 and SCMT 12 04 12-PR 4335, cutting depth – from 1.96 to 2.54 mm, feed rate – from 0.36 to 0.373 mm/rev, cutting speed – from 199 to 314 m/min.
- 045 (Finish Boring) – Holder HT30D-CY32 320-32 (adapter 570-SDXCL-32-11), insert DCMT 11 T3 12-PM 4335, cutting depth – 1 mm, feed rate – 0.16 mm/rev, cutting speed – from 195 m/min.

The data obtained from the automated selection open up the question of verifying the results through practical experiments, which may be an important topic for future research.

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. Tantsiura, I., Klimov, O., Stakhovskyi, O., & Huzenko, S. (2024). Porivnialnyi analiz zasobiv aerosolnoho maskuvannia, yaki znakhodiatsia na ozbroienni u Zbroinykh Syl Ukrainy ta armii zakhidnykh krain-partneriv [A comparative analysis of aerosol camouflage equipment in service with the Armed Forces of Ukraine and the armies of Western partner countries.] *Viiskovo-tekhnicnyi zbirnyk – Military and technical collection*, (30), 8–13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>.
2. Akademiia Zbroinykh Syl Ukrainy. (1997). Osnovy zabezpechennia radiatsiinoho, khimichnoho ta biolohichnoho zakhystu viisk u boiu ta operatsiiakh [Fundamentals of ensuring radiation, chemical and biological protection of troops in combat and operations].
3. Stakhovskyi, O. V., Yermakov, H. V., & Babenko, V. P. (2014). Systemy maskuvannia ta imitatsii tankovykh viisk [Systems of camouflage and imitation of tank troops]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl – Collection of scientific works of the Kharkiv Air Force University*, (3[40]), 28–31.
4. Briankin, S. S., Ozeran, H. P., Skyba, O. V., Domanov, I. O., Rybachok, D. V., Luk'ianets, O. V., & Briankin, O. S. (2024). Analysis of the use of aerosol (smoke) devices in modern combat operations. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i seryfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Collection of Scientific Works of the State Research Institute for Testing and Certification of Armaments and Military Equipment*, 22(4), 14–22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02>.
5. Ostapchuk, E. S., Abramson, A. N., & Zaplishna, A. I. (2022). Aktualnist aerosolnoho maskuvannia v umovakh suchasnykh boiovykh dii [Relevance of aerosol masking in the conditions of modern combat operations]. *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo: VI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia – Chemical technology: science, economics and production: VI International scientific and practical conference* (pp. 75–79). Sumskyi derzhavnyi universytet.
6. Dovhopolov, A., Kolesnyk, V., Lanchynskyi, V., Kyrilenko, M., & Yarosh, V. (2024). Development of a test bench for automatic determination of the speed, flow rate and temperature of the flue stream. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: New Solutions in Modern Technology*, (3[21]), 25–31. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2024.03.04>.
7. Khudov, H. V., Kuprii, V. M., Hrebenchuk, O. A., & Svirhun, D. V. (2016). Propozytsii shchodo maskuvannia pozytsii radiotekhnichnoho pidrozdilu vid zasobiv povitrianoi optyko-elektronnoi rozvidky [Proposals for masking the position of a radio engineering unit from airborne optical-electronic reconnaissance]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl – Collection of scientific works of the Kharkiv University of the Air Force*, (1), 18–22.
8. Rybydailo, A., Khokhlenko, O., Polishko, S., & Shevchuk, V. (2024). Osnovni napriamy rozvytku zasobiv maskuvannia ta imitatsii dlia protydiv zasobam rozvidky ta urazhennia protyvnyka [Main directions of development of camouflage and imitation means for countering reconnaissance and defeating enemy infiltrators]. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy imeni Ivana Cherniakhovskoho – Collection of scientific papers of the Center for Military and Strategic Research of the Ivan Chernyakhovsky National University of Defense*, (2), 89–98. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/89-98>.
9. Natsionalna akademiia oborony Ukrainy [National Academy of Defense of Ukraine]. (2002). *Aerosolna protydiva tekhnichnym zasobam rozvidky vysokotochnoi zbroi protyvnyka v boiu ta operatsiakh – Aerosol countermeasures by technical means of reconnaissance of high-precision enemy weapons in combat and operations*. NAOU

10. Poplavets, S. I. (2014). Efficiency of the application of remote-control systems for smoke release for camouflaging stationary objects with aerosol devices [Effectiveness of using remote smoke control systems for masking stationary objects with aerosol means]. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika – Weapon Systems and Military Technology*, (1), 198-200.

11. Derzhavnyi standart Ukrainy. (2015). DSTU 7806:2015. Prokat iz lehovanoi konstruktsiinoi stali. Tekhnichni umovy [Rolled products of alloy structural steel. Specifications].

12. Derzhavnyi standart Ukrainy. (2019). DSTU 8938:2019. Truby stalevi bezshovni hari-acheformovani [Hot-formed seamless steel pipes].

Список використаних джерел

1. Танцюра, І., Клімов, О., Стаховський, О., & Гузенко, С. (2024). Порівняльний аналіз засобів аерозольного маскування, які знаходяться на озброєнні у Збройних Силах України та армій західних країн-партнерів. *Військово-технічний збірник*, (30), 8-13. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.30.2024.8-13>.

2. *Основи забезпечення радіаційного, хімічного та біологічного захисту військ у бою та операціях*. Київ: видання Академії Збройних Сил України, 1997. 168 с.

3. Стаховський, О. В., Єрмаков, Г. В., Бабенко, В. П. (2014). Системи маскування та імітації танкових військ. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, 3(40), 28-31.

4. Брянкін, С. С., Озеран, Г. П., Скиба, О. В., Доманов, І. О., Рибачок, Д. В., Лук'янець, О. В., & Брянкін, О. С. (2024). ANALYSIS OF THE USE OF AEROSOL (SMOKE) DEVICES IN MODERN COMBAT OPERATIONS. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 22(4), 14-22. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.02>

5. Остапчук, Е. С., Абрамсон, А. Н., Заплішна, А. І. (2022). Актуальність аерозольного маскування в умовах сучасних бойових дій. *Збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції «Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво»*, м. Шостка, 23-25 листопада 2022 року (с. 75-79). Сумський державний університет.

6. Dovhopolov, A., Kolesnyk, V. Lanchynskyi, V., Kyrylenko, M., Yarosh, V. (2024). Development of a test bench for automatic determination of the speed, flow rate and temperature of the flue stream. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, (3(21)), 25–31. doi: 10.20998/2413-4295.2024.03.04.

7. Худов, Г. В., Купрій, В. М., Гребенчук, О. А., & Свіргун, Д. В. (2016). Пропозиції щодо маскування позиції радіотехнічного підрозділу від засобів повітряної оптико-електронної розвідки. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, (1), 18-22.

8. Рибидайло, А., Хохленко, О., Полішко, С., & Шевчук, В. (2024). Основні напрями розвитку засобів маскування та імітації для протидії засобам розвідки та ураження противника. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського*, 2, 89-98. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2024-3-83/89-98>.

9. Аерозольна протидія технічним засобами розвідки високоточної зброї противника в бою та операціях. (2002). Видання Національної академії оборони України.

10. Поплавець, С. І. (2014). Ефективність застосування систем дистанційного управління димопуском для маскування стаціонарних об'єктів аерозольними засобами. *Системи озброєння і військова техніка*, (1), 198-200.

11. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови.

12. ДСТУ 8938:2019 Труби сталеві безшовні гарячеформовані.

Отримано 16.04.2025

УДК 621.9

**Олександр Дмитрович Євдокимов¹, Віталій Олександрович Колесник²,
Андрій Юрійович Довгополов³, Микола Сергійович Биков⁴,
Денис Іванович Фесенко⁵**

¹аспірант 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>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології 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>

³кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування, верстати та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна)
E-mail: a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

⁴аспірант кафедри технології машинобудування, верстати та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна), ГО «СКІМ Індустрія 5.ЮА» (Суми, Україна)
E-mail: m.bykov@tmvi.sumdu.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-0912-7496>

⁵аспірант кафедри технології машинобудування, верстати та інструменти
Сумський державний університет (Суми, Україна), ГО «СКІМ Індустрія 5.ЮА» (Суми, Україна)
E-mail: fesenkodenys9@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-9252-0197>

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ КОРПУС МОРТИРИ

У дослідженні розглянуто підвищення продуктивності обробки деталі корпус мортири аерозольної системи АЕК-902 «Туча», що активно застосовується для маскування та підвищення бойової спроможності техніки та автотранспорту, служить як допоміжний засіб для евакуації та як спосіб захисту від дронів. Методом автоматизованого підбору виконано підбір ріжучого інструменту та продуктивних режимів різання для механічних токарних операцій, з використанням програмного забезпечення Sandvik ToolGuide, Walter GPS та Iscar Tool Advisor. Виконано порівняння отриманих режимів, розраховано продуктивність обробки методом розрахунку об'єму знятого матеріалу (MMR) та побудовано порівняльні графіки продуктивності. На основі отриманих даних розроблено рекомендації щодо вибору ріжучого інструменту та режимів обробки для конкретних токарних операцій. Для торцювання рекомендовано використання державки DSSNL 2525M 15 із пластинкою SNMG 15 06 16-PR, що забезпечує глибину різання 2 мм, подачу 0,707 мм/об і швидкість різання 279 м/хв. Для чорнового та чистового точіння оптимальним вибором є державка DCLNL 2525K 15 із пластинкою CNMG 15 04 16-PR 4425, з глибиною різання від 2,55 до 3,9 мм, подачею від 0,5 до 0,518 мм/об і швидкістю різання 173–279 м/хв. Для чорнового розточування рекомендовано державки C4-570-3C 40 173, A25T-SSKCL 12 із пластинками CCMT 12 04 12-PR 4425 і SCMT 12 04 12-PR 4335, що працюють на глибинах різання 1,96–2,54 мм, подачі 0,36–0,373 мм/об і швидкості різання 199–314 м/хв. Чистове розточування найкраще виконувати державкою HT30D-CY32 320-32 із пластинкою DCMT 11 T3 12-PM 4335, що забезпечує глибину різання 1 мм, подачу 0,16 мм/об і швидкість різання 195 м/хв. Отримані дані базуються на рекомендаціях програмного забезпечення і потребують подальшої експериментальної перевірки в умовах реального виробництва. Верифікація результатів шляхом натурного експерименту дозволить оцінити відповідність розрахункових режимів фактичним показникам обробки, уточнити параметри та врахувати можливі відхилення. Це є актуальним напрямом подальших досліджень у сфері автоматизованого підбору інструменту та оптимізації процесів механічної обробки.

Ключові слова: точіння; обробка; режими різання; продуктивність обробки; автоматизований підбір; ріжучий інструмент; розточування.

Рис.: 4. Табл. 5. Бібл.: 12.

**Ілля Іванченко¹, Володимир Кореньков², Юлія Лашина³,
Олена Мельник⁴, Сергій Лапач⁵**

¹магістр, кафедра технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: i.vanchenko-mm24@iit.kpi.ua

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: korenkov.volodymyr@iit.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> **ResearcherID:** ADG-1590-2022

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: lashyna.yuliia@iit.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3451-8740> **ResearcherID:** AAE-9728-2019

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)
E-mail: melnyk.olena@iit.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262> **ResearcherID:** NGS-5051-2025

⁵старший викладач кафедри технології машинобудування КПІ ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: lapach.serhei@iit.kpi.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9399-191X>

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА СТІЙКІСТЬ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ СВЕРДЛІННІ ВУГЛЕПЛАСТИКУ

При виготовленні виробів із вуглепластиків однією з найпоширеніших операцій оброблення різанням є свердління отворів. Цей процес супроводжується інтенсивним зносом різального інструменту та специфічними дефектами отворів. У роботі представлено результати дослідження впливу режимів різання та геометричних параметрів свердла на кількість придатних отворів при свердлінні спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі. Якість отворів оцінювалась за допомогою світло-оптичної мікроскопії, за критерій якості прийнято значення коефіцієнта розширення. Робастний план експерименту побудовано на основі псевдовипадкових ЛПт-чисел. Регресійна модель та її статистичні характеристики отримані за допомогою програмного забезпечення ПРИАМ. Аналіз отриманої моделі, маргінальних рівнянь регресії та маргінальних поверхонь відгуку дозволив сформулювати рекомендації щодо вибору режимів різання. Встановлено, що для заданих умов найбільшу кількість придатних отворів можна отримати при частоті обертання шпинделя 1050 об/хв та подачі 0,17 мм/об – це твердження справедливе для всіх досліджуваних діаметрів свердел (2 мм, 2,5 мм, 3 мм, 4 мм) та для обох варіантів кута при вершині свердла (90°, 118°), при цьому свердла з кутом заточування 118° демонструють кращі результати.

Ключові слова: вуглепластик; CFRP; свердління; режими різання; композиційні матеріали; регресійний аналіз.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 16.

Актуальність теми дослідження. Вуглепластик – сучасний композиційний матеріал, який широко використовуються в машинобудуванні та авіабудуванні, завдяки поєднанню таких властивостей, як висока міцність, жорсткість та зменшення ваги порівняно з деталями, виготовленими з металевих конструкційних матеріалів. При виготовленні конструкцій із вуглепластиків важливим завданням є оброблення отворів. Механічне оброблення різанням, зокрема свердління, є одним із найбільш поширених методів отримання отворів необхідної якості [1]. При цьому процес супроводжується інтенсивним зносом різального інструменту та виникненням специфічних дефектів отворів, таких як розширення композиту, незрізані волокна, витягування волокон [2].

Постановка проблеми. Завищені режими різання призводять до збільшення осьової сили при свердлінні, що може спричинити розширення на виході отвору, а також до виривання волокон. У свою чергу, занижені режими різання призводять до збільшення часу контакту інструменту із заготовкою, сприяючи зношенню інструменту. Вибір режимів різання є важливим для забезпечення високої якості обробленої поверхні отворів і уникнення пошкоджень матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Покращення результатів свердління волокнистих полімерних композиційних матеріалів можна досягти шляхом впливу на параметри, подані нижче [3].

Режими різання. Подача і швидкість різання є параметрами, які мають найбільш значний вплив на видалення стружки, а отже, на сили різання, температуру в зоні оброблення та якість отворів [2]. У роботі [4] встановлено, що зі збільшенням подачі збільшується середня шорсткість поверхні та умовний коефіцієнт розширення,

оскільки збільшення швидкості зняття матеріалу призводить до зростання сили різання і більшого пошкодження поверхні. У цій роботі авторам вдалось зменшити розшарування на виході інструменту та покращити продуктивність при свердлінні композитів CFRP (англ. – Carbon-fiber reinforced polymer) шляхом оптимізації параметрів свердління. Одним із перспективних рішень є адаптивне керування величиною подачі [5] замість використання постійного її значення.

Швидкість різання впливає на температуру різання, а отже, на геометричні дефекти та швидкість зношування інструменту. Авторами роботи [6] встановлено, що чим більша швидкість різання, тим вища температура на виході з отвору. Це пояснюється тим, що чим більше швидкість обертання шпинделя, тим вище частота контакту ріжучої кромки з абразивними волокнами і таким чином, утворення тепла збільшується. Втім, у роботі [7] в результаті дослідження впливу параметрів свердління композитів CFRP на температури різання, виявилось, що зі збільшенням швидкості обертання шпинделя від $n_1 = 1500$ об/хв до $n_2 = 4500$ об/хв осьова сила зменшилась на 13,9 %, а пікова температура різання знизилась на 63,2 %.

Геометрія свердла. Для оброблення отворів у композиційних матеріалах можуть використовуватись свердла різної геометрії. Вплив геометрії інструменту на якість оброблених отворів досліджувався в роботах [8-11]. Вдосконалення включають: зміну кутів при вершині, підточування поперечної кромки, зміну кількості різальних кромок, використання ступінчастих свердел та інші методи.

Матеріал свердла. Вибір інструментального матеріалу є важливим, однак дослідженнями встановлено, що він має менший вплив на поведінку вуглепластиків ніж геометрія інструменту [2]. Для оброблення волокнистих полімерних композиційних матеріалів використовують свердла зі швидкорізальної сталі та твердих сплавів із покриттям та без покриття, а також свердла з надтвердих матеріалів, оснащені різальною частиною з композиційного полікристалічного алмазу [12; 13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. З урахуванням вищезазначеного, актуальним завданням при розробці технологічної операції свердління композиційного матеріалу є вибір режимів різання та геометричних параметрів різального інструменту, які забезпечать найбільшу стійкість інструменту і необхідну якість отворів.

Метою дослідження є визначення впливу режимів різання, діаметра та кута при вершині свердла на стійкість різального інструменту при свердлінні отворів у вуглепластику [14]. Це дасть можливість надати рекомендації щодо вибору режимів різання, а саме частоти обертання шпинделя і подачі, а також кута при вершині свердла, при обробці отворів свердлами різних діаметрів.

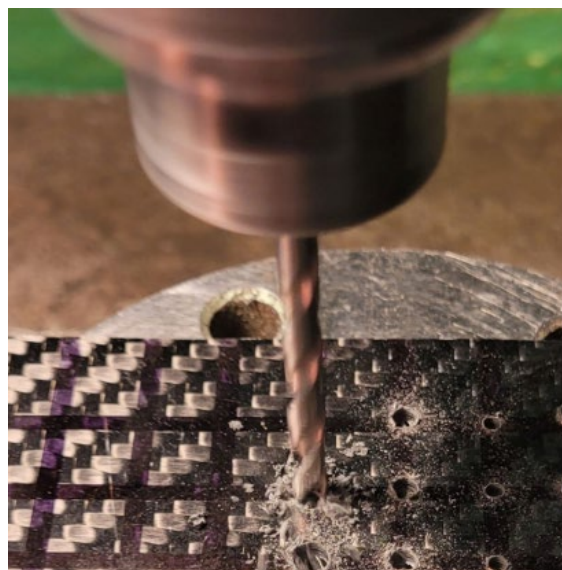
Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: обрати методику дослідження стійкості свердел, скласти план експерименту, виконати досліді відповідно до плану, побудувати математичну модель залежності стійкості інструменту від обраних параметрів, виконати аналіз отриманої моделі, надати рекомендації щодо вибору режимів різання.

Виклад основного матеріалу. Обладнання та інструменти. Дослідження виконувались на вертикально-свердлильному верстаті 2A125. Для заточування сверدل використувався універсально заточувальний верстат 3E642. Для оцінювання розшарування отворів використано мікроскоп Meiji Techno MA749.

Матеріали. Залежність зносу різального інструменту від режимів різання досліджувалась для вуглепластику, який постачається у вигляді плити товщиною 2 мм, виготовленої за технологією 3K Twill, при свердлінні отворів спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі діаметрами 2; 2,5; 3 і 4 мм з кутом при вершині свердла 90° та 118°. На рис. 1 представлено використане обладнання, інструмент та матеріали.



а



б

Рис. 1. Проведення дослідів:

а – закріплення зразка на столі верстата; б – свердління отворів

Методи дослідження. Стійкість свердел залежно від режимів різання та геометричних параметрів інструменту оцінювалась за кількістю отворів, які були оброблені із задовільною якістю. Якість отворів оцінювалась за величиною розшарування на основі аналізу цифрових зображень, отриманих за допомогою світло-оптичної мікроскопії. Для оцінювання якості отворів використано коефіцієнт розшарування F_d [15], який розраховується за формулою:

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_0},$$

де $D_{\max}$ – максимальний діаметр пошкодженої зони; D_0 – номінальний діаметр просвердленого отвору.

За критерій якості отвору було прийнято значення коефіцієнта розшарування до 1,15.

Характерні зображення отворів різних діаметрів, які характеризуються значенням коефіцієнта розшарування в межах норми, та отворів, де коефіцієнт розшарування перевищує норму, подані на рис. 2.

Досліджувалась залежність кількості просвердлених отворів одним інструментом, які відповідають обраному критерію якості, від таких факторів:

X_1 – частота обертання шпинделя, рівні варіювання: 540, 676, 950, 1350 об/хв;

X_2 – діаметр свердла, рівні варіювання: 2; 2,5; 3; 4 мм;

X_3 – подача, рівні варіювання: 0,1; 0,13; 0,17; 0,22 мм/об;

X_4 – кут при вершині свердла, рівні варіювання: 90°, 118°.

Емпіричні математичні моделі побудовано з використанням методів регресійного аналізу та планування експерименту. В експерименті три фактори варіюються на чотирьох рівнях і один фактор на двох рівнях. Робастний план побудовано на базі псевдовипадкових ЛП_т чисел (табл. 1):

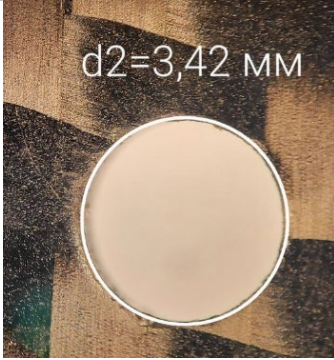
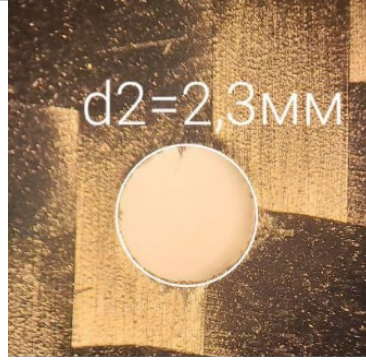
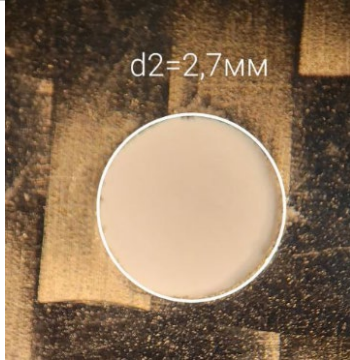
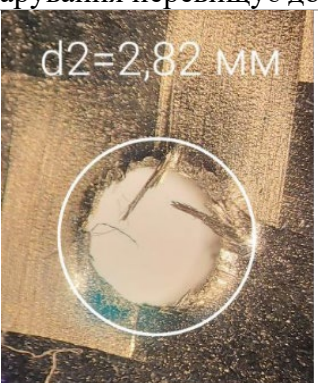
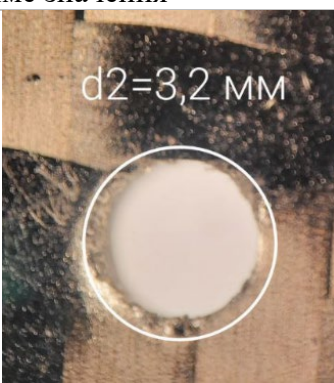
Номинальний діаметр отвору		
Ø 3 мм	Ø 2 мм	Ø 2,5 мм
Розшарування в межах норми		
		
$F_d = 1,14$	$F_d = 1,15$	$F_d = 1,08$
Коефіцієнт розшарування перевищує допустиме значення		
		
$F_d = 1,23$	$F_d = 1,41$	$F_d = 1,28$

Рис. 2. Приклад аналізу просвердлених отворів

Таблиця 1 – Робастний план експерименту

№ досл.	X_1	X_2	X_3	X_4
1	0,501976	0,498024	0,498024	0,498024
2	0,249012	0,750988	0,245059	0,750988
3	0,754941	0,245059	0,750988	0,245059
4	0,12253	0,624506	0,87747	0,87747
5	0,628458	0,118577	0,371542	0,371542
6	0,375494	0,371542	0,624506	0,118577
7	0,881423	0,87747	0,118577	0,624506
8	0,059289	0,940711	0,687747	0,3083
9	0,565217	0,434783	0,181818	0,814229
10	0,312253	0,181818	0,940711	0,561265
11	0,818182	0,687747	0,434783	0,055336
12	0,185771	0,3083	0,3083	0,687747
13	0,6917	0,814229	0,814229	0,181818
14	0,438735	0,561265	0,055336	0,434783
15	0,944664	0,055336	0,561265	0,940711
16	0,027668	0,529644	0,403162	0,213439
17	0,533597	0,023715	0,909091	0,719368
18	0,280632	0,27668	0,150198	0,972332
19	0,786561	0,782609	0,656126	0,466403
20	0,15415	0,150198	0,529644	0,84585
21	0,660079	0,656126	0,023715	0,339921
22	0,407115	0,909091	0,782609	0,086957

Після визначення кількості дослідів та розроблення плану проведення експериментів, побудовано робочу матрицю експериментів (табл. 3) за формулою:

$$X_{iu} = X_{i \min} + \xi_{iu}(X_{i \max} - X_{i \min}),$$

де X_{iu} – розраховане натуральне значення i -го фактору для u -го експерименту;

$X_{i \min}$ – мінімальне значення i -го фактору;

$X_{i \max}$ – максимальне значення i -го фактору;

ξ_{iu} – кодоване (в діапазоні від 0 до 1) значення i -го фактору для u -го експерименту.

Результати дослідження. Узагальнена робоча матриця експерименту, що включає значення рівнів факторів та результати проведених дослідів, наведена у табл. 2.

Таблиця 2 – Робоча матриця експериментів

Теоретичні значення рівнів варіювання факторів		Фактори				Функція	
		Частота обертання шпинделя, об/хв	Діаметр свердла, мм	Подача, мм/об	Кут при вершині свердла	Кількість отворів	
		Формалізоване позначення факторів та натуральні значення їх рівнів				Формалізоване позначення функції	
$F_1 \dots F_3$	F_4	X_1	X_2	X_3	X_4	y	
0	0	540	2	0,1	90	Значення результатів дослідів	
1	1	676	2,5	0,13	118		
2	-	950	3	0,17	-		
3	-	1350	4	0,22	-		
Дослід 1		950	2,5	0,13	90	y_1	y_2
2		540	4	0,1	118	17	16
3		1350	2	0,22	90	11	13
4		540	3	0,22	118	10	9
5		950	2	0,13	90	5	7
6		676	2,5	0,17	90	14	16
7		1350	4	0,1	118	12	15
8		540	4	0,17	90	15	17
9		950	2,5	0,1	118	14	11
10		676	2	0,22	118	15	14
11		1350	3	0,13	90	13	10
12		540	2,5	0,13	118	16	14
13		950	4	0,22	90	14	12
14		676	3	0,1	90	16	18
15		1350	2	0,17	118	5	8
16		540	3	0,13	90	17	19
17		950	2	0,22	118	7	10
18		676	2,5	0,1	118	17	16
19		1350	4	0,17	90	13	10
20		540	2	0,17	118	15	17
21		950	3	0,1	90	13	15
22		676	4	0,22	90	8	11
						9	8

Джерело: розроблено авторами.

Багатофакторна статистична модель для функції відгуку отримана з використанням програмного забезпечення ПРИАМ [16]:

$$\hat{y} = 12,8066 + 3,34616x_1 - 3,69898z_3 - 2,00537z_1x_3 - 3,0485z_1 + 2,24964x_4 + 1,26181x_2,$$

де $x_1 = 0,00206961 * (X_1 - 866,818)$;

$z_1 = 2,36613 * ((x_1^2) - 0,329322 * x_1 - 0,395574)$;

$x_2 = 0,897959 * (X_2 - 2,88636)$;

$x_3 = 15,493 * (X_3 - 0,155455)$;

$z_3 = 1,96696 * ((x_3^2) - 0,169754 * x_3 - 0,520928)$;

$x_4 = 0,0654762 * (X_4 - 102,727)$.

Статистичні характеристики моделі, отримані в програмному забезпеченні ПРИАМ, наведені в табл. 3. У результаті аналізу цих характеристик встановлено, що отримана математична модель адекватна, інформативна, а також стійка як структурно, так і обчислювально.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики математичної моделі

Параметри статистичного аналізу		Умовні позначення	Значення параметрів $\hat{y}$
Перевірка гіпотези про відтворюваність результатів експерименту	Дисперсія відтворюваності	$S_{\text{відт}}^2$	2,455
	Середнє квадратичне відхилення	$S_{\text{відт}}$	1,567
	Число ступенів вільності для дисперсії відтворюваності	$f_{\text{відт}1}$	22
		$f_{\text{відт}2}$	1
	Експериментальне значення G-критерія	$G_{\text{експ}}$	0,083
	Критичне значення G-критерія	$G_{\text{крит}}$	0,365
Перевірка гіпотези про адекватність моделі	Рівень значущості	α	0,05
	Дисперсія адекватності	$S_{\text{ад}}^2$	1,335
	Експериментальне значення F-критерія	$F_{\text{експ}}$	1,838
	Критичне значення F-критерія	$F_{\text{крит}}$	2,306
	Число ступенів вільності для адекватності	$f_{\text{ад}1}$	6
		$f_{\text{ад}2}$	15
	Рівень значущості	α	0,05
Аналіз отриманої моделі на інформативність	Адекватність моделі	адекватна	
	Коефіцієнт множинної кореляції	R	0,960013
	Число ступенів вільності для коефіцієнтів математичної моделі	$f_{k'}$	6
	Число ступенів вільності для остаточної суми квадратів	$f_{\text{ост}R}$	37
	Експериментальне значення F-критерія	$F_{\text{експ}}$	29,398
	Критичне значення F-критерія	$F_{\text{крит}}$	2,356
	Рівень значущості	α	0,05
	Критерій Бокса і Веца	γ	2
Інформативність математичної моделі		хороша	
Число обумовленості		$\text{cond}(X^T X)$	1,252
Середнє абсолютних величин відносних похибок апроксимації, %		$ \bar{e}_{\text{увідн}} $	7,51
Середнє абсолютних величин абсолютних похибок апроксимації		$ \bar{e}_u $	0,81475
Частка розсіювання, що пояснюється математичною моделлю		$Q_{\hat{y}}$	0,92

Джерело: розроблено авторами.

Ступінь впливу окремих факторів на функцію відгуку оцінювався за відсотком участі та коефіцієнтом кореляції з відгуком (табл. 4). З'ясовано, що найбільший вплив має фактор частоти обертання шпинделя (27,7 %) та кут при вершині свердла (17,8 %) та взаємодія факторів частоти обертання шпинделя і подачі.

Таблиця 4 – Ступінь впливу факторів на функцію відгуку

Регресор	Коефіцієнт кореляції з відгуком	Частка впливу, %
x_1	0,526	27,7
z_3	0,396	14,1
$z_1 x_3$	0,346	15,7
z_1	0,176	12,9
x_4	0,141	17,8
x_2	0,088	3,9

Джерело: розроблено авторами.

Характер залежності $\hat{y}$ (кількість отворів, просвердлених одним інструментом, для яких значення коефіцієнта розшарування не перевищує 1,15, N , шт.) від факторів X_1 (частота обертання шпинделя, n , об/хв) та X_3 (подача, f , мм/об) для різних варіантів геометрії свердла (D ,

мм – діаметр свердла, 2φ – кут при вершині свердла) ілюструється графіками маргінальних рівнянь регресії (рис. 3) та графіками маргінальних поверхонь відгуку (рис. 4).

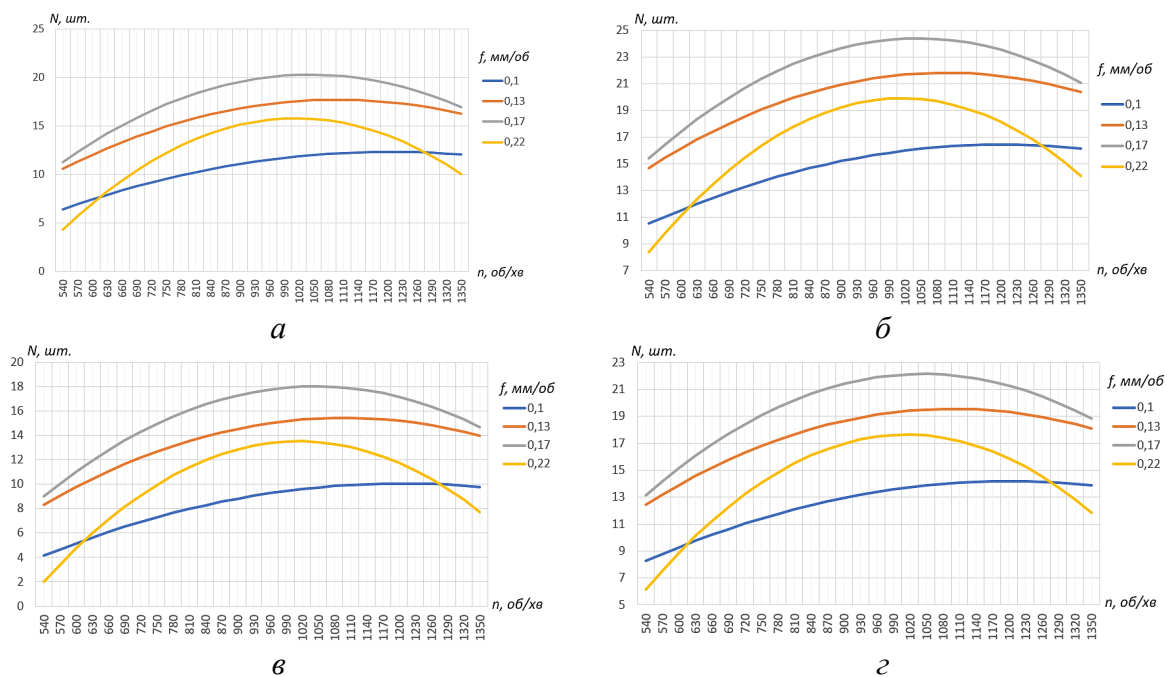


Рис. 3. Графіки маргінальних рівнянь регресії при фіксованих значеннях:
а – $D = 4$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; б – $D = 4$ мм, $2\varphi = 118^\circ$; в – $D = 2$ мм, $2\varphi = 90^\circ$;
г – $D = 2$ мм, $2\varphi = 118^\circ$

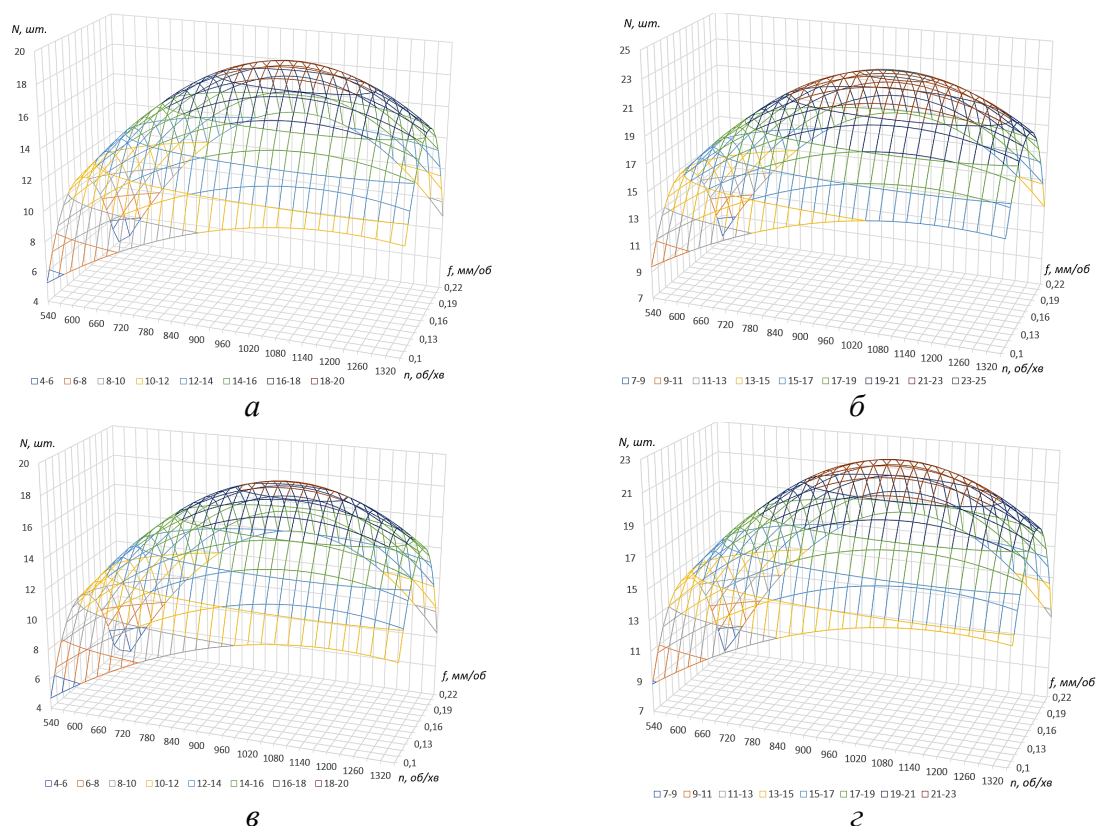


Рис. 4. Маргінальні поверхні відгуку при фіксованих значеннях:
а – $D = 3$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; б – $D = 3$ мм, $2\varphi = 118^\circ$;
в – $D = 2,5$ мм, $2\varphi = 90^\circ$; г – $D = 2,5$ мм, $2\varphi = 118^\circ$

У результаті аналізу графіків маргінальних рівнянь регресії (рис. 3) та графіків маргінальних поверхонь відгуку (рис. 4) встановлено, що в умовах, які досліджувались, максимальна кількість придатних отворів може бути отримана при таких значеннях факторів: $X_1 = 1050$ об/хв та $X_3 = 0,17$ мм/об – це твердження є справедливим для всіх досліджуваних діаметрів свердел (2; 2,5; 3; 4 мм) та обох варіантів кутів заточування (90° , 118°). З погляду стійкості інструменту при обробці вуглепластику кут заточування 118° демонструє кращі результати.

Висновки. Визначення впливу режимів різання, діаметру та кута при вершині свердла на стійкість різального інструменту при свердлінні вуглепластику виконувалось за допомогою експериментального визначення кількості отворів, оброблених одним свердлом, для яких значення коефіцієнта розшарування не перевищує 1,15.

В результаті статистичного оброблення результатів дослідів за допомогою програмного забезпечення ПРІАМ отримано емпіричну модель, яка описує залежність кількості придатних отворів від частоти обертання шпинделя, подачі, кута при вершині свердла та діаметру свердла. У результаті аналізу статистичних характеристик моделі встановлено, що модель адекватна, інформативна, а також стійка структурно і обчислювально.

Встановлено, що для досліджуваних умов найбільший вплив мають фактори: частота обертання шпинделя (27,7 %), кут при вершині свердла (17,8 %), та взаємодія факторів частоти обертання шпинделя і подачі.

Аналіз отриманих залежностей дозволив сформулювати наступні рекомендації при свердлінні отворів у вуглепластику: при свердлінні отворів малих діаметрів (від 2 до 4 мм) спіральними свердлами зі швидкорізальної сталі кут заточування 118° демонструє кращі результати, ніж кут 90° , рекомендовані режими різання: частота обертання шпинделя 1050 об/хв, подача 0,17 мм/об.

Можливі напрямки подальших досліджень: визначення доцільних режимів різання при обробленні вуглепластиків для свердел вдосконаленої геометрії, виготовлених з інших інструментальних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Пасічник, В. А., Глоба, О. В. (2011). Технології отримання отворів у композиційних матеріалах і методи контролю якості обробки. *Технологические системы*, 4(57), 48-53.
2. Xu, J., Geier, N., Shen, J., Krishnaraj, V., & Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: Fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>.
3. Пасічник, В. А., Черказний, В. Ю. (2015). Систематизація та аналіз методів механічного оброблення отворів в композиційних матеріалах. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, 1(73), 29-37.
4. Wang, Q., & Jia, X. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>.
5. Yaşar, N., & Günay, M. (2019). Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>.
6. Zhang, B., Wang, F., Wang, X., Li, Y., & Wang, Q. (2020). Optimized selection of process parameters based on reasonable control of axial force and hole-exit temperature in drilling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(3-4), 797–812. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05868-9>.
7. Chen, R., Li, S., Li, C., Li, P., Jiang, Y., & Ko, T. J. (2021). Influence of fiber direction and processing parameters on drilling temperature of CFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1663–1669. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0329-2>.
8. Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Aguiar Vieira, A., & Torres Marques, A. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures*, 92(7), 1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.

9. Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L., & Bradley, S. (2009). Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009>.
10. Sandvik coromant. (n.d.). Sandvik Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrigill-863>.
11. Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335–339. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00749-0).
12. Hrechuk, A., Bushlya, V., M'Saoubi, R., & Ståhl, J.-E. (2018). Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
13. Karpat, Y., & Bahtiyar, O. (2015). Comparative Analysis of PCD Drill Designs During Drilling of CFRP Laminates. *15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO)*, 31, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.094>.
14. Іванченко, І. І. (2024). Визначення періоду стійкості спіральних свердл при обробленні композиційних матеріалів [Неопубл. магист. дисерт].
15. Chen, W.-C. (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), 1097–1108. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00095-8).
16. Lapach, S., Radchenko, S. & Babich P. (1993). *Planning, regression and analysis of PRIAM models (PRIAM)*.

References

1. Pasichnyk, V. A., Globa, O. V. (2011). Tekhnolohii otrymannia otvoriv u kompozytsiynykh materialakh i metody kontroliu yakosti obrobky [Technologies for obtaining holes in composite materials and methods for controlling the quality of processing]. *Tekhnologicheskyye sistemy – Technological system*, 4(57), 48-53.
2. Jinyang Xu, Norbert Geier, Jiaxin Shen, Vijayan Krishnaraj, S. Samsudeensadham, A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, 2023, Pages 9677-9707/. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>.
3. Pasichnyk, V. A. (2015). Systematyzatsiia ta analiz metodiv mekhanichnoho obroblennia otvoriv v kompozytsiynykh materialakh. [Systematization and analysis of methods for machining holes in composite materials]. *Visnyk NTUU «KPI». Seriya mashynobuduvannia – Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical Engineering Series*, 1(73), 29-37.
4. Wang, Q., & Jia, X. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>.
5. Yaşar, N., & Günay, M. (2019). Experimental investigation on novel drilling strategy of CFRP laminates using variable feed rate. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(3). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1658-2>.
6. Zhang, B., Wang, F., Wang, X., Li, Y., & Wang, Q. (2020). Optimized selection of process parameters based on reasonable control of axial force and hole-exit temperature in drilling of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(3-4), 797–812. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05868-9>.
7. Chen, R., Li, S., Li, C., Li, P., Jiang, Y., & Ko, T. J. (2021). Influence of fiber direction and processing parameters on drilling temperature of CFRP. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(4), 1663–1669. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0329-2>.
8. Durão, L. M. P., Gonçalves, D. J. S., Tavares, J. M. R. S., de Albuquerque, V. H. C., Aguiar Vieira, A., & Torres Marques, A. (2010). Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates. *Composite Structures*, 92(7), 1545–1550. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.035>.
9. Shyha, I. S., Aspinwall, D. K., Soo, S. L., & Bradley, S. (2009). Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12-13), 1008–1014. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009>.
10. Sandvik coromant. (n.d.). Sandvik Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrigill-863>.

11. Hocheng, H., & Tsao, C. C. (2003). Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140(1-3), 335–339. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(03\)00749-0](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(03)00749-0).
12. Hrechuk, A., Bushlya, V., M'Saoubi, R., & Ståhl, J.-E. (2018). Experimental investigations into tool wear of drilling CFRP. *Procedia Manufacturing*, 25, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.086>.
13. Karpat, Y., & Bahtiyar, O. (2015). Comparative Analysis of PCD Drill Designs During Drilling of CFRP Laminates. *15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations (15th CMMO)*, 31, 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.094>.
14. Ivanchenko, I. I. (2024). Vyznachennia periodu stiikosti spiralnykh sverdl pry obroblenni kompozytsiinykh materialiv [Determination of the stability period of twist drills when processing composite materials]. *Neopublikovana mahisterska robota – Not-published Master thesis*.
15. Chen, W.-C. (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(8), 1097–1108. [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00095-8).
16. Lapach, S., Radchenko, S. & Babich P. (1993). *Planning, regression and analysis of PRIAM models (PRIAM)*.

Отримано 19.05.2025

UDC 621.9.01

Ilya Ivanchenko¹, Volodymyr Korenkov², Yulia Lashina³, Olena Melnyk⁴, Serhiy Lapach⁵

¹Master, Department of Mechanical Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: i.ivanchenko-mmi24@lil.kpi.ua

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: korenkov.volodymyr@lil.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1911-9496> **ResearcherID:** [ADG-1590-2022](https://orcid.org/ADG-1590-2022)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: lashyna.yuliia@lil.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3451-8740> **ResearcherID:** [AAE-9728-2019](https://orcid.org/AAE-9728-2019)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: melnyk.olena@lil.kpi.ua **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262> **ResearcherID:** [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

⁵Senior Lecturer, Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)
E-mail: lapach.serhei@lil.kpi.ua **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9399-191X>

INFLUENCE OF CUTTING MODES ON THE CUTTING TOOL LIFE WHEN DRILLING CARBON-FIBER REINFORCED POLYMER

In the manufacture of products made of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), one of the most common cutting operations is drilling holes. This process is accompanied by intensive wear of the cutting tool and specific hole defects.

The paper presents results of the study of the effect of cutting modes and geometric parameters of the drill on the tool life when drilling CFRP with high-speed steel twist drills. The tool life was assessed by the number of quality holes, the criterion for replacing the tool was the value of the hole delamination coefficient (the ratio of the maximum diameter of the damaged area to the nominal diameter of the drilled hole). The quality of holes using the light-optical microscopy was assessed. Empirical mathematical models were obtained using regression analysis and experimental design methods. The robust experimental design was built based on the pseudo-random LPT numbers. The regression model and its statistical characteristics were obtained using the PRIAM software. Statistical characteristics of the model indicate its adequacy, informativeness and stability. The analysis of the degree of individual factors' influence on the response function was carried out based on the percentage of participation and the correlation coefficient. It was found that the spindle speed (27.7 %), the drill sharpening angle (17.8 %), and the interaction of the spindle speed and feed have the greatest influence.

The analysis of the resulting model, marginal regression equations and marginal responses allowed to formulate recommendations for choosing cutting modes. It was found that for the given conditions the greatest number of quality holes can be obtained at the spindle speed of 1050 rpm and a feed rate of 0.17 mm/rev – this statement is true for all studied drill diameters (2 mm...4 mm) and for both angle options (90°, 118°), while drills with a sharpening angle of 118° demonstrate better results. The results obtained during the study can be used to optimize technological processes for drilling CFRP and for choosing proper cutting tool, which, in turn, will contribute to increasing both productivity and processing quality.

Keywords: carbon fiber; CFRP; drilling; cutting modes; composite materials; regression analysis.

Fig.: 4. Table: 4. References: 16.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-158-163](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-158-163)

УДК 678.023

Анатолій Юрійович Абаєв¹, Микола Петрович Швед²¹студент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: abayev@uk.net. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>²кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

E-mail: npchved46@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРИ ДЛЯ СТІЙКОГО МАЙБУТНЬОГО: ЕКСТРУЗІЯ БІО- ТА ФОТОДЕСТРУКТИВНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

У роботі розглянуто проблему забруднення навколишнього середовища полімерними відходами та перспективи використання біо- та фотодеструктивних полімерів (PLA, PHA, PBAT) для виготовлення плівок. Описано особливості екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, зазначено оптимальні температурні та швидкісні параметри процесу. Розкрито роль добавок у формуванні властивостей плівок. Визначено значення міжнародних стандартів для оцінки біорозкладності. Зроблено висновок про важливість впровадження інноваційних полімерів у пакувальну промисловість задля екологічної стійкості.

Ключові слова: біополімери; екструзія; PLA; PHA; PBAT; біорозкладність; пакувальні плівки; фоторозклад.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі проблема забруднення навколишнього середовища полімерними відходами набуває дедалі більшої гостроти. Традиційні полімери, такі як поліетилен (PE) та поліпропілен (PP), розкладаються у природних умовах сотні років, що створює значне навантаження на екологію. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є розробка та використання біорозкладних полімерних матеріалів, зокрема полілактиду (PLA), полігідроксіалканоатів (PHA) та полібутиленадипат-терефталату (PBAT). Ці матеріали здатні розкладатися під впливом природних факторів, таких як волога, кисень, ультрафіолетове випромінювання та діяльність мікроорганізмів [1-2]. Водночас вони демонструють механічні властивості, які дозволяють використовувати їх для виробництва плівкових матеріалів, що можуть стати екологічною альтернативою традиційним пластикам [3].

Постановка проблеми. Значний науковий і промисловий інтерес викликає питання розробки ефективної технології виготовлення біорозкладних плівок. Метод екструзії з роздуванням є одним із найбільш поширених і економічно вигідних процесів у виробництві полімерних пакувальних матеріалів. У цьому дослідженні розглядається можливість використання PLA, PHA та PBAT для отримання біо- та фоторозкладних полімерних плівок методом екструзії на каскадному дисково-шестеренному екструдері.

PLA, PHA та PBAT мають різні характеристики, що визначають їхнє застосування в пакувальній індустрії. PLA зазвичай використовують для виготовлення легких плівок і упаковок, проте його термостійкість обмежена. PHA і PBAT, у свою чергу, мають кращі механічні властивості при низьких температурах, що робить їх більш ефективними для виготовлення плівок, які повинні витримувати більші навантаження. У порівнянні з традиційними полімерними матеріалами, PLA, PHA та PBAT демонструють значні переваги з погляду біорозкладу та екологічної безпеки. Їхнє широке застосування в майбутньому дозволить знизити забруднення навколишнього середовища пластиковими відходами, що є критично важливою проблемою для сучасного суспільства. На рис. 1 наведено графік порівняння механічних, термічних і біорозкладних властивостей PLA, PHA та PBAT.

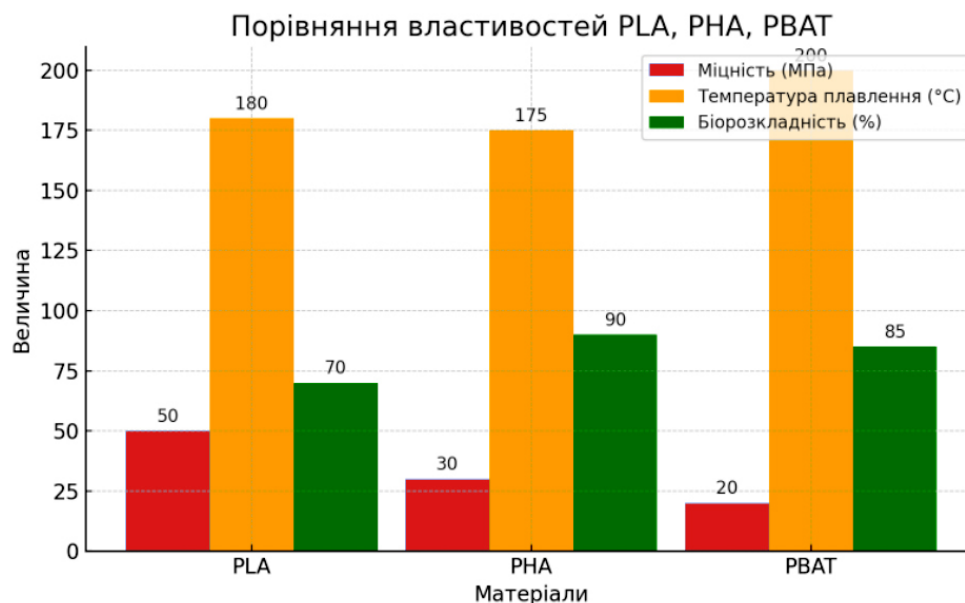


Рис. 1. Порівняння властивостей PLA, PHA та PBAT

Для підтвердження екологічної безпеки біополімерів важливо звернути увагу на міжнародні стандарти, які регулюють використання біорозкладних матеріалів [4]. Одним із таких стандартів є ISO 14851, який визначає методи тестування біорозкладу матеріалів у морській воді. Цей стандарт є важливим для оцінки здатності біополімерів, таких як PLA, PHA та PBAT, до розкладу в природних умовах, зокрема в морському середовищі. Такі тестування допомагають встановити, наскільки швидко та безпечно ці матеріали можуть розкладатися, зменшуючи загрози для навколишнього середовища. Відповідність цим стандартам є важливим кроком до забезпечення довіри споживачів та промислових виробників до біорозкладних полімерів, а також до їхнього впровадження на масовому рівні в різних сферах, включаючи пакувальну промисловість.

Виділення недосліджених частин проблеми. Незважаючи на активний розвиток досліджень у сфері біорозкладних полімерів (PLA, PHA, PBAT), залишаються недостатньо вивченими ключові аспекти їх промислового застосування. Зокрема, недостатньо досліджено: оптимальну взаємодію полімерних матриць із добавками (пластифікаторами, стабілізаторами) при високошвидкісній екструзії, що впливає на стабільність процесу та якість плівок; довгострокову поведінку матеріалів у реальних умовах експлуатації, особливо під комбінованим впливом УФ-випромінювання, механічних навантажень та біотичних факторів; ефективність розкладу в різних природних середовищах (окрім морської води, згідно ISO 14851), таких як ґрунти чи прісноводні екосистеми; масштабування технології для каскадних дисково-шестеренних екструдерів, зокрема вплив параметрів екструзії на механічні властивості плівок. Ці прогалини обмежують широке впровадження екологічно безпечних плівок у пакувальну галузь, що потребує комплексного науково-технічного обґрунтування.

Мета. Розробити та оптимізувати технологію виробництва біо- та фоторозкладних полімерних плівок (PLA, PHA, PBAT) методом екструзії з роздуванням на каскадному дисково-шестеренному екструдері, з оцінкою їхніх властивостей та відповідності міжнародним стандартам біорозкладу, для застосування в пакувальній промисловості як екологічної альтернативи традиційним пластикам.

Методика дослідження. Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського здійснює дослідження процесів виробництва плівки з такими якостями на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою

«знизу – нагору» рис. 2. Процес екструзії біо- та фоторозкладних плівок з PLA, PHA і PBAT передбачає встановлення певних температурних і швидкісних параметрів для кожного етапу. Типові температури для екструзії PLA знаходяться в межах 180–210 °С, для PHA — 170–190°С, а для PBAT — 190–220°С. Ці температури є оптимальними для плавлення матеріалів та забезпечення їхнього ефективного змішування.

Екструзійна установка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, рис. 2, що складається з дозатора 1, дискового розплавлювача – гомогенізатора 2 та дозуючого шестеренчастого насоса 3. Для виготовлення плівок із PLA, PHA чи PBAT необхідно ретельно підготувати полімерну суміш, що включає не лише самі полімери, але й добавки, які покращують властивості кінцевого продукту. До таких належать пластифікатори, стабілізатори, антиоксиданти, а також барвники або інші речовини, що покращують розкладність матеріалу під впливом світла та природних факторів [5].

Вихідний гранульований полімер і необхідні добавки шнековими дозаторами 1 подаються в бункер дискового екструдера. Особливу увагу слід приділити вибору стабілізаторів для біополімерів, оскільки вони часто схильні до деградації при високих температурах або впливу ультрафіолетових променів. Окрім того, додавання пластифікаторів дозволяє збільшити гнучкість плівок, що важливо для багатьох застосувань, зокрема для пакувальних матеріалів. Процес змішування, усереднення та фарбування полімерної маси відбувається в дисковому екструдері 2, а створення тиску та дозування – у шестеренному насосі 3, які з'єднані послідовно.

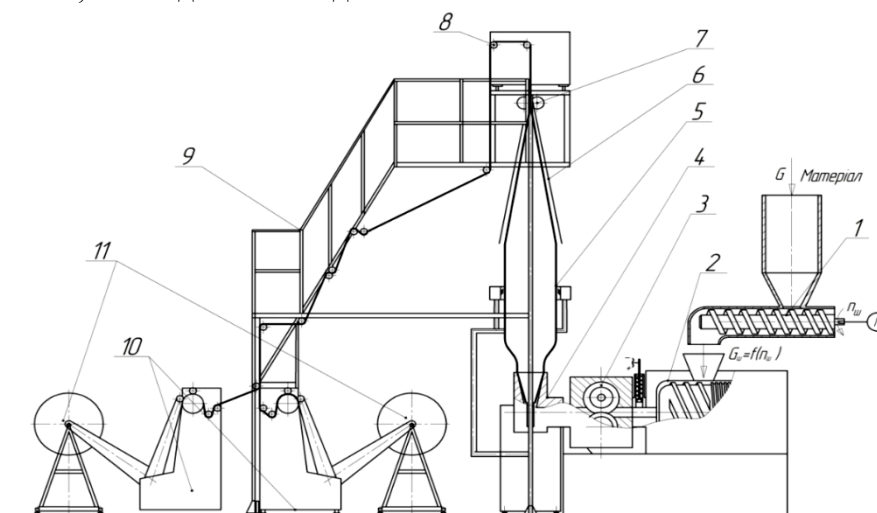


Рис. 2 – Схема установки для виробництва рукавної плівки

1 – дозатор сировини; 2 – екструдер дисковий; 3 – насос шестеренний; 4 – формуюча головка; 5 – кільце охолодження; 6 – складальні пластини; 7 – тягучі валки; 8 – обвідні валки; 9 – естакада; 10 – маніпуляційні верстати; 11 – прийомні верстати

Полімерна маса рухається від завантажувальної воронки до формувальної головки. Під час руху вздовж дискового екструдера в багатозахідній завантажувально-пластикувальній зоні гранули ущільнюються, завдяки обертанню диска й дисипації механічної енергії приводу в теплову плавляться, а в торцевих робочих зазорах розплав гомогенізуються і стає однорідним. Далі, отриманий розплав під тиском 5-7 МПа заповнює міжзубні впадини шестеренного насоса 3 і переноситься ними в зону високого тиску 20-25 МПа, проходить кільцеву формувальну головку 4, одночасно через дорн кільцевої головки в середину рукава подається повітря, яке роздуває його до певних розмірів, надаючи трубчасту форму. Після формування плівки за допомогою роздування, наступним етапом є її охолодження. Для цього плівка обдувається холодним повітрям у кільці охолодження

5, що дозволяє швидко знизити температуру полімеру і запобігти його деформації. Далі плівковий рукав складається за допомогою складальних пластин 6 і направляється між гумованими валками тягнучого пристрою 7, обминаючи обвідні валки 8 на верстаті-маніпулятори 10. Після них складена плівка попадає на прийомні верстати 11, де намотується в рулони у вигляді рукава або полотна.

Результати дослідження. Було проведено дослідження з виробництва PLA плівки в екструзійній установці, яка розроблена на основі високоефективного та універсального каскадного дисково-шестеренчатого екструдера, що складається з дискового розплавлювача, черв'ячного екструдера-домішувача та дозуючого шестеренчастого насоса на основі методу екструзії рукава з роздуванням за схемою «знизу – нагору». Як сировину було використано гранули Ingeo 2003D від компанії NatureWorks LLC. У процесі дослідження для забезпечення оптимального плавлення та транспортування PLA Ingeo 2003D отримали наступний температурний профіль нашого екструдера (табл. 1).

Таблиця 1 – Температурний профіль екструдера

Зона екструзії	Температура, °C
Зона подачі	185-190
Зона пластифікації	190-195
Зона компресії	195-205
Зона дозування	205-210
Матриця	210

У процесі проведення реологічних досліджень отримали залежність в'язкості PLA від температури (рис. 3). В'язкість розплаву PLA Ingeo 2003D зменшується зі збільшенням температури, що є характерним для термопластичних полімерів. Це впливає на текучість матеріалу під час екструзії та, відповідно, на якість кінцевої плівки.

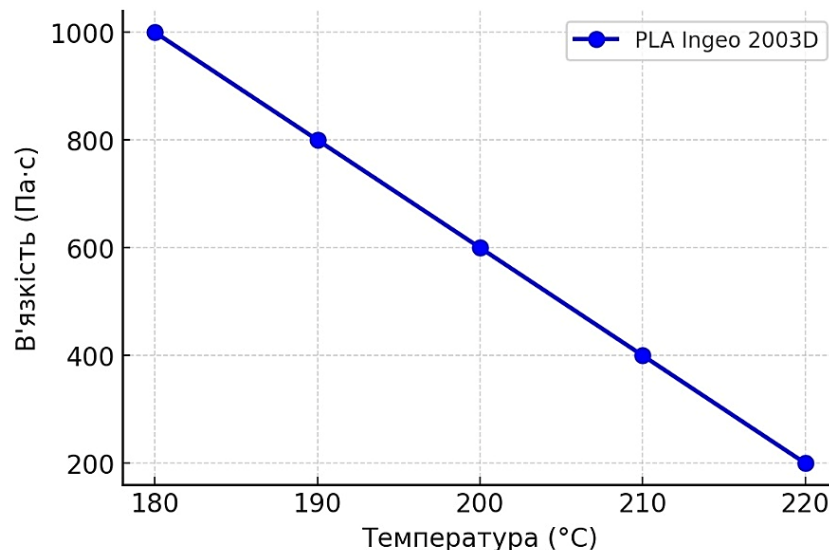


Рисунок 3. Залежність в'язкості PLA Ingeo 2003D від температури

PLA Ingeo 2003D має псевдопластичну поведінку – в'язкість зменшується при збільшенні швидкості зсуву. При надто високій швидкості зсуву PLA може деградувати та втрачати механічні властивості. Тому важливо підібрати оптимальне співвідношення температури та швидкості подачі розплаву шестеренчастим насосом, що допомагає уникнути термодеструкції та отримати якісну плівку. Під час роботи отримали оптимальний температурний профіль для PLA Ingeo 2003D в діапазоні 185–210 °C та оптимальну швидкість обертання шестерні дозуючого шестеренчастого насоса $n = 0,75$ об/с, при цьому опір формуючої головки склав $P = 25,3$ МПа, а продуктивність лінії $Q = 0,011$ кг/с.

Висновки. За вищенаведеною технологією можна одержувати найрізноманітніші екологічно безпечні плівки, які стануть у пригоді як виробнику, так і споживачу. Вдосконалення методів виробництва біо- та фоторозкладних плівок, зокрема на основі екструзії, дозволяє інтегрувати ці матеріали в наявні технологічні лінії без значних змін у виробничих процесах, що зменшує витрати та робить перехід до використання нових матеріалів більш доступним для виробників. При цьому традиційні пакувальні матеріали постійно вдосконалюються, що підвищує їх якість. Завдяки впровадженню нових наукових і технологічних розробок вдається покращити властивості матеріалів, зменшити товщину та вагу упаковки, а також створити нові види багаторазової тари [6]. Таким чином, біо- та фотодеструктивні полімери є важливим кроком до створення сталих екологічних технологій у пакувальній промисловості та інших сферах, що з часом можуть стати основним інструментом у боротьбі з пластиковими відходами. Їх широке впровадження вимагатиме подолання певних труднощів, але з огляду на важливість екологічної проблеми це є перспективним напрямком для майбутнього розвитку полімерної галузі.

Список використаних джерел

1. Замотаєв, П. В. (1999). Полімери що руйнуються під дією природних факторів. *Упаковка*, (№4), 34-37
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging. *arxiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium - Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Гавва, О. М. (2007). Шляхи вдосконалення та розвитку технологій і обладнання пакування. У *Матеріали науково-практичної конференції «Пакувальна індустрія»* (с. 162–175).

References

1. Zamotaiev, P. V. (1999). Polimery shcho ruiniuiutsia pid diieiu pryrodnykh faktoriv. [Polymers that degrade under the influence of natural factors]. *Upakovka – Packaging*, (4), 34-37.
2. Sudesh, K., Abe, H., & Doi, Y. (2000) Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. *Progress in Polymer Science*, 25(10), 1503-1555. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00035-6).
3. He, X., Jin, Y., Tang, L., & Huang, R. (2023). *A brief review and perspective on the functional biodegradable films for food packaging*. arxiv preprint <https://arxiv.org/abs/2311.16932>.
4. *International Organization for Standardization*. (2020). ISO 14851: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials in an aqueous medium- Method by measuring the oxygen demand in a closed respirometer. <https://www.iso.org/standard/72776.html>.
5. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers. Processing and Products*. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-00487-1>.
6. Havva, O. M. (2007). Shliakhy vdoskonalennia ta rozvytku tekhnolohii i obladnannia pakuvannia. [Ways to improve and develop packaging technologies and equipment]. *Pakuvalna industriia: naukovo-praktychna konferentsiia – Packaging industry: Scientific and Practical Conference* (pp. 162-175).

Отримано 23.04.2025

Anatolii Abayev¹, Mykola Shved²

¹Student, Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: abayev@uk.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-0039-9655>

²PhD in Technical Sciences,
Associate Professor of Department of Machinery and Apparatus of Chemical and Petroleum Refineries
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: npchved46@gmail.com. **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-7725-1447>

**INNOVATIVE POLYMERS FOR A SUSTAINABLE FUTURE:
EXTRUSION OF BIO- AND PHOTODEGRADABLE POLYMER FILMS**

The article addresses the global issue of environmental pollution caused by conventional polymer waste and explores innovative solutions using biodegradable and photodegradable polymers, including: polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). These materials are capable of decomposing under the influence of natural factors such as moisture, oxygen, ultraviolet radiation, and microbial activity. The study focuses on the extrusion-blow molding process for producing environmentally friendly films from these polymers using a cascade disk-gear extruder. The structure of the extrusion line is described, including the disc plasticizer, screw mixing extruder, and gear metering pump.

Optimal processing conditions were defined, namely: typical temperature ranges are 180–210 °C for PLA, 170–190 °C for PHA, and 190–220 °C for PBAT. The technological process also includes the precise formulation of the polymer blend, which incorporates various additives—such as plasticizers, stabilizers, antioxidants, and pigments—to enhance film performance and degradability. Particular attention is given to the role of stabilizers, considering the thermal and UV sensitivity of biodegradable polymers.

In the article, relevance of international standards is emphasized, especially ISO 14851, which determines test methods for biodegradation of plastics in marine environments. Compliance with these standards is crucial for industrial implementation of these materials. The research conducted at the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum-Refining Industries of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute confirms the feasibility of applying biodegradable materials using existing industrial extrusion equipment with minimal modification.

It is concluded in the study that development and industrial integration of bio- and photodegradable films represent a vital step toward sustainable packaging technologies. These materials offer significant ecological benefits and have the potential to replace conventional plastics in multiple applications, supporting the global movement toward circular economy and environmental responsibility.

Keywords: biopolymers; extrusion; PLA; PHA; PBAT; biodegradability; packaging films; photodegradation.

Fig.: 3. **Table:** 1. **References:** 6.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-164-170](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-164-170)

УДК 621.91

**Андрій Сергійович Василенко¹, Олена Олексіївна Мельник²,
Анатолій Анатолійович Субін³**

¹студент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: 37robota2021@gmail.com

²кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: melnik.olena@kpi.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>, ResearcherID: [NGS-5051-2025](https://orcid.org/NGS-5051-2025)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
E-mail: anatoliy.subin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5747-2397>, ResearcherID: [AAC-5786-2022](https://orcid.org/AAC-5786-2022)

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ОБРОБЛЕННЯ ОСЬОВИМ ЛЕЗОВИМ РІЗАЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

У роботі розглянуто оптимізація режимів різання в умовах цифрової трансформації машинобудування. Особливу увагу приділено обробленню отворів осьовими лезовими інструментами з використанням ЧПУ. Запропоновано алгоритм автоматизованого розрахунку режимів, що враховує характеристики матеріалів, інструментів і вимоги до точності. Впровадження таких рішень сприяє підвищенню якості, ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

Ключові слова: осьовий інструмент; послідовність оброблення; лезове оброблення; осьовий лезовий інструмент; свердло, режими різання при свердлінні.

Рис.: 2. Бібл.: 7.

Актуальність теми. Головним процесом у машинобудівному виробництві є процес оброблення різанням. Він усе ще залишається актуальним для дослідження, оскільки є досить універсальним і в сучасних умовах здатен до оброблення всіх конструкційних матеріалів. Нині важливу роль відіграє впровадження швидких методів прогнозування режимів різання в процесі оброблення. Левова частка при цьому спрямована саме на вдосконалення їх практичного застосування.

Стрімке зростання інформаційних технологій є характерною ознакою сьогодення в машинобудуванні. Це призводить до зміни в організації, управлінні та роботі машинобудівного виробництва. Поряд з активним використанням верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ), широко використовуються автоматизовані системи проєктування технологічних процесів з залученням технології штучного інтелекту. Додатково слід зазначити, що завдяки зростанню інформаційних технологій є можливість скорочення фінансових витрат загалом і витрат часу окремо у виробництві. Взагалі всі зазначені аспекти описано у стратегії CALS [1] і, відповідно, її реалізації в машинобудуванні.

Охоплення всіх аспектів створення єдиної інтегрованої моделі виробу є основною моделлю CALS технологій, тобто системний підхід, що ґрунтується на врахуванні всіх етапів життєвого циклу (ЖЦ) продукції – від її створення до утилізації. Інтеграція цих етапів забезпечується стандартизацією подання інформації або її результатів, у процесах проєктування, матеріально-технічного забезпечення, виробництва, ремонту, обслуговування тощо. Такий підхід формує нову основу для інформаційної інтеграції та забезпечення спадковості використання даних.

Правильно підібрані режими різання зменшують витрати енергії, зношування інструментів і кількість браку. Це знижує собівартість виробництва, що особливо важливо в умовах високої конкуренції та зростання цін на матеріали й енергоносії.

Осьові лезові інструменти використовуються для створення отворів із високими вимогами до точності та шорсткості поверхні. Алгоритми визначення параметрів оброблення враховують характеристики матеріалу, геометрію інструменту та динаміку різання. В контексті цифрової трансформації та концепції CALS, ці алгоритми є основою для

автоматизації та інтеграції в системи ЧПУ та САПР. Сукупність подібних алгоритмів для всіх видів різальних інструментів на всіх етапах оброблення забезпечує створення єдиної інформаційної моделі, що полегшує проєктування, планування та контроль виробництва в цілому. Крім того, розробка алгоритмів дозволяє адаптувати режими різання до унікальних властивостей матеріалів, забезпечуючи їх ефективне оброблення.

Постановка проблеми. Ядром CALS-технологій є застосування CAD/CAM/CAE підсистем. Якщо CAD є достатньо стандартизованим і шаблонізованим, то впровадження і використання CAM/CAE потребують додаткових зусиль. Технологічна підготовка виробництва передбачає наступні етапи: науково дослідні розробки, конструкторські підготовки виробництва, технологічну підготовку виробництва та системи управління процесами оброблення.

Враховуючи велику вагу оброблення в собівартості виготовлення деталі, визначення оптимальних умов обробки є критичним для забезпечення максимальної продуктивності в рамках технологічної підготовки виробництва.

Метою статті є вибір методики й розробка алгоритму автоматизованого визначення режиму різання при свердлінні та розсвердлюванні для заданих умов оброблення із забезпеченням найбільшої продуктивності згідно з CALS.

Результати дослідження. Дослідження технологічних процесів у машинобудівному виробництві дозволили визначити їх розподіл за критерієм трудомісткості [2; 3; 4] відповідно рис. 1.



Рис. 1. Розподіл технологічних процесів на ринку

Як видно з рис. 1, свердління займає 36 % потреб в технологічних процесах. Найчастіше в роботі при типових послідовностях оброблення осьовими інструментами забезпечують оброблення отворів з точністю розмірів IT12-IT7 та параметрами шорсткості обробленої поверхні Ra20-Ra1,25. Типовим і доступним інструментом є гвинтові спіральні свердла зі швидкорізальних інструментальних сталей. На цей час на ринку спостерігається активне використання нових інструментальних матеріалів, зокрема металокерамічних твердих сплавів. При цьому свердла діаметром до 12 мм зберігають традиційну конструкцію і повністю виготовляються з твердого сплаву. Натомість свердла більших розмірів мають нову модульну конструкцію, де різальні кромки формуються за допомогою змінних багатограних пластин із різноманітними системами механічного кріплення.

Як правило, на виробництві для визначення режимів різання при обробленні осьовими інструментами, зазвичай застосовують два методи: аналітичний і табличний. Аналітичний метод передбачає розрахунок необхідних параметрів на основі математичних моделей, створених за результатами експериментальних досліджень. Табличний метод опирається на заздалегідь складені таблиці режимів різання, які враховують різні умови

технологічних процесів і містять дискретні значення, що допускають певну похибку залежно від конкретних умов. До впровадження обчислювальної техніки табличний метод мав явні переваги, оскільки пошук параметрів у друкованих таблицях займав менше часу, ніж виконання розрахунків за математичними моделями, які часто обмежувалися недостатньою кількістю вихідних даних для їх створення.

Широке впровадження інформаційних технологій кардинально змінило ситуацію. Наявність і використання персонального комп'ютера робітником, у сукупності із сучасним програмним середовищем і технологій штучного інтелекту дозволяють використовувати саме аналітичні методи при визначенні параметрів оброблення. Звісно математичні моделі що використовуються корелюються з попередньо визначеними табличними значеннями для типових параметрів оброблення, але головним чинником є сама модель оброблення і алгоритм визначення.

Існуючі алгоритми розрахунку режимів різання для осьового інструменту [2-4] використовують довідкові таблиці для визначення параметрів різання. Кожен з виробників інструментів або верстатів використовує власні таблиці для своєї номенклатури виробів. Тобто, використовують загальні рекомендації, для сталі HSS-свердлом (High Speed Steel - швидкорізальна сталь): $V_c = 15\text{--}30$ м/хв, для твердосплавного свердла: $V_c = 50\text{--}100$ м/хв, а якщо з мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР), то швидкість можна збільшити на 10–30 % (наприклад, для сталі з МОР: $V_c = 20\text{--}40$ м/хв для HSS. Також проаналізувавши [2-4], можливо виділити основні ключові рекомендації фірм і для коригування швидкості різання, зменшить V_c на 10–20 % для твердих матеріалів (наприклад, нержавіюча сталь). Для глибокого свердління ($L/D > 5$) зменшить V_c на 20–30 % для стабільності процесу. Якщо використовується MQL (Minimum quantity lubrication) або кріогенне охолодження, V_c можна збільшити на 20–50 %.

Тому аналіз процесу оброблення дозволив розробити узагальнений алгоритм (рис. 2) розрахунку режимів оброблення осьовим лезовим різальним інструментом, що передбачає послідовне вирішення типових технологічних завдань, а саме:

- аналіз геометричних характеристик отвору, що оброблюється передбачає визначення його розміру, виду отвору-наскрізний або глухий; характеру оброблення отвору - в суцільному матеріалі або попередньо виготовленого в конструкції заготовки;
- аналіз фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу та їх можливий розбіг у партії заготовок, способу виготовлення заготовки, що є основою для обґрунтованого вибору групи та підгрупи інструментального матеріалу;
- аналіз характеристик якості оброблення отвору, які встановлено кресленням деталі, визначає технологічну послідовність його оброблення;
- обґрунтування вибору виду і моделі металорізального верстата для виконання процесу оброблення та аналіз технологічних можливостей верстата, а саме: діапазону частоти обертання шпинделя, діапазону подач, допустимої сили механізму подач, допустимого моменту на шпинделі верстата та потужності двигуна головного приводу верстата.

Зазначені технологічні параметри вказані в технічному паспорті кожного металорізального верстата. Зазвичай на діючому виробництві вибір верстата обмежується специфічними умовами, що визначають тип обладнання та його розташування на виробничій ділянці. Тобто є певна обмеженість можливостей, в межах ділянки чи цеху.

При розробці програмного забезпечення було використано такі математичні залежності [5-7].

Відповідно, глибина різання при свердлінні визначається за формулою:

$$h_c = \frac{D_c}{2}, \quad (1)$$

а для розсвердлювання:

$$h_{pc} = \frac{D_{pc} - D_c}{2}, \quad (2)$$

де D_{pc} – діаметр свердла для розсвердлювання; D_c – діаметр свердла для свердління.

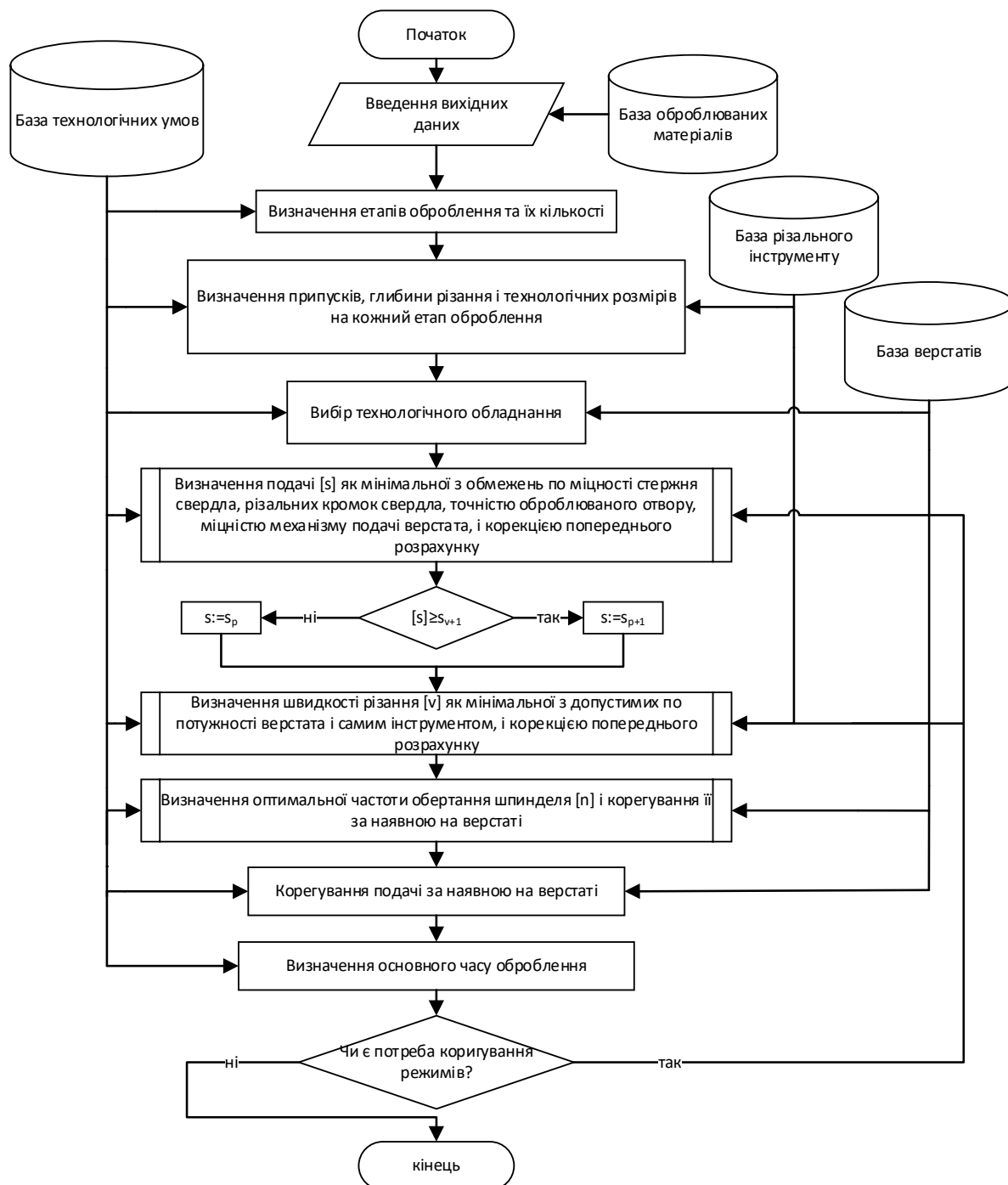


Рис. 2. Алгоритм роботи створеного програмного забезпечення

Алгоритм розрахунку режимів різання при свердлінні передбачає визначення таких подач:

$[S]_{MC}$ – подача, яка допускається міцністю стержня свердла, $[S]_{PK}$ – подача, яка допускається міцністю різальних кромок, $[S]_{TO}$ – подача, яка допускається точністю оброблення, $[S]_{MP}$ – подача, яка допускається міцністю механізму подач.

Подача, яка допускається міцністю стержня свердла $[S]_{MC}$ визначається за формулою:

$$[S]_{MC} = \left[\frac{2 \cdot \sigma_{3T} \cdot D^{3-Z_M}}{10^6 \cdot \sqrt{3} \cdot n_3 \cdot C_M \cdot h^{x_M} \cdot K_M} \right]^{1/Y_M}, \quad (3)$$

де $[S]_{MC}$ - подача, яка допустима міцністю стержня свердла, мм/об; σ_{3T} – границя міцності при згині матеріалу свердла, МПа, якщо свердло виготовлене з швидкорізальної сталі або суцільне твердосплавне. Якщо використовується свердло з твердосплавними напайками, σ_B – границя міцності на розрив матеріалу стержню свердла (найчастіше це леговані конструкційні сталі 45X або 40XMФА термооброблені), n_3 – коефіцієнт запасу, який забезпечує безпечну роботу свердла при нормальному зносі. У розрахунках приймають $n_3 = 2,5$ для оброблення сталі та $n_3 = 4$ для оброблення чавунів. C_M , K_M , Z_M , Y_M - коефіцієнти та показники ступеня у формулі.

Подача, яка допускається міцністю різальних кромок $[S]_{PK}$ визначається за формулою:

$$[S]_{PK} = C_S \cdot D \cdot 0,6, \quad (4)$$

де C_S - коефіцієнт пропорційності.

Визначення подачі за міцністю механізму подач $[S]_{MP}$ визначається за формулою:

$$[S]_{MP} = \left[\frac{[P_0]_{MP}}{10 C_P \times D^{Z_P} \times h^{x_P} \times K_P} \right]^{1/Y_P}, \quad (5)$$

де $[P_0]_{MP}$ - найбільша осьова сила, допустима верстатом, Н; C_P , K_P , Z_P , Y_P - коефіцієнт пропорційності, поправочний коефіцієнт та показники ступеня у формулі осьової сили різання.

Як розрахункову приймають найменшу з перелічених величин з урахуванням можливої корекції за результатами попереднього розрахунку $[S]_{i-1}$:

$$[S] = \min \{ [S]_{MC}; [S]_{PK}; [S]_{TO}; [S]_{MP}; [S]_{i-1} \}. \quad (6)$$

Далі необхідно розрахувати швидкість різання, яка допускається різальними властивостями свердла $[V]_i$ та швидкості різання, яка допускається потужністю двигуна головного приводу верстата $[V]_B$.

Визначити швидкості за різальними властивостями інструменту $[V]_i$ визначається за формулою:

$$[V]_i = V = \frac{C_V \cdot K_V \cdot D^{Z_V}}{(60 \cdot T^m \cdot h^{x_V} \cdot S^{y_V})}, \quad (7)$$

де T – період стійкості інструмента; C_V – коефіцієнт; Z_V , x_V , y_V , m - показники ступеня; K_V – поправочний коефіцієнт, що враховує відмінність умов різання від табличних.

Визначення швидкості різання за потужністю двигуна головного приводу верстата $[V]_B$ визначається за формулою:

$$[V]_B = \frac{N_{дв} \cdot \eta}{20 \cdot C_M \cdot D^{Z_M-1} \cdot S^{y_M} \cdot h^{x_M} \cdot K_M}, \quad (8)$$

де $N_{дв}$ - потужність електродвигуна, кВт; η - коефіцієнт корисної дії ланки головного руху різання ($\eta = 0,8 \dots 0,9$ або $\eta \approx 0,85$).

Як розрахункову швидкість різання визначають як найменшу з перелічених величин з урахуванням можливої корекції за результатами попереднього розрахунку $[V]_{i-1}$:

$$[V] = \min \{ [V]_i; [V]_B; [V]_{i-1} \}. \quad (9)$$

Визначення оптимальної частоти обертання шпинделя визначається за формулою:

$$[n] = \frac{60 \times 1000 \times [V]_{min}}{\pi \times D} \quad (10)$$

Для оцінювання продуктивності процесу оброблення за розрахованими режимами визначають основний час оброблення:

$$T_o = \frac{l_{xi} \times i}{n \times S_o} \rightarrow \min, \quad (11)$$

де l_{xi} – довжина ходу інструмента; n – частота обертання шпинделя; S_o – поздовжня подача; i – число робочих ходів.

Враховуючи (1.10) та $i = \frac{z_{omax}}{h}$, отримаємо формулу:

$$T_o = \frac{l_i \cdot z_{omax}}{1000 \cdot n \cdot V \cdot S \cdot \frac{C_{To}}{h \cdot S \cdot V}}, \quad (12)$$

$$\text{де } C_{To} = \frac{l_i \cdot z_{omax}}{1000}. \quad (13)$$

Отримаємо таку залежність для критерію оптимізації:

$$\begin{aligned} T_o &\rightarrow \min, \\ h &\rightarrow \max; S_o \rightarrow \max; V \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (14)$$

Наприкінці алгоритму надається можливість корегування режимів для забезпечення кращої відповідності критеріям оптимізації. Скореговані значення є обмежувачами в варіантах визначення подачі (6) і швидкості різання (9).

Таким чином розроблений алгоритм дозволяє вирішити задачу визначення оптимальних умов чорнкової обробки осьовим лезовим різальним інструментом. Послідовність дій в алгоритмі і чітка визначеність параметрів що розраховуються дозволяють достатньо легко реалізувати запропонований алгоритм у вигляді прикладної програми або програмного модуля. Реалізація алгоритму дозволить проєктувати операції обробки за критеріями максимізації продуктивності.

Висновок. Розроблений алгоритм розрахунку режимів різання для свердління та розсвердлювання дозволяє проєктувати технологічні операції для досягнення максимальної продуктивності. Запропонована формалізація розрахунків режимів різання для обробки осьовими інструментами необхідна для їх подальшої інтеграції в CAD/CAM/CAE-системи. Окрім ефекту для осьової обробки це також сприяє підвищенню ефективності технологічної підготовки виробництва.

Список використаних джерел

1. Замірець, М. В., Ілюшко, В. М., Мелешенко, С. Ю., Максимова, К. Л., Плотнікова, З. В., & Рикова, В. В. (2005). *CALS-технології в забезпеченні життєвого циклу електронних засобів: Частина 1*. Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут».
2. Sandvik Coromant. (n.d.). Drilling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling>.
3. Sandvik Coromant. (n.d.). CoroDrill DE10 brochure. [https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us__a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_\(en-us\).pdf](https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us__a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_(en-us).pdf).
4. Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (2nd ed.). Oxford University Press.
5. Паливода, Ю. Є., Дячун, А. Є., & Лещук, Р. Я. (2019). *Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки*. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.
6. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Доброскок, В. Л., Залога, В. О., Новосьолов, Ю. К., & Якубов, Ф. Я. (2011). *Основи теорії різання матеріалів* (2-ге вид., перероб. і доп.). Новий Світ–2000.
7. Глоба, О. В., Вовк, В. В., Красновид, Д. А., & Солодкий, В. І. (2022). *Теорія різання: Підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.

References

1. Zamirets, M. V., Ilyushko, V. M., Meleshenko, S. Yu., Maksymova, K. L., Plotnikova, Z. V., & Rykova, V. V. (2005). CALS-tekhnologii v zabezpechenni zhyttievoho tsykladu elektronnykh zasobiv: Chastyna 1 [CALS technologies in the life cycle support of electronic devices: Part 1]. *Natsionalnyi aerokosmichnyi universytet «Kharkivskiy aviatsiyniy instytut» - Kharkiv: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*.
2. Sandvik Coromant. (n.d.). Drilling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/drilling>.
3. Sandvik Coromant. (n.d.). CoroDrill DE10 brochure. [https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us_a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_\(en-us\).pdf](https://www.sandvik.coromant.com/api/publications/view?url=https://cdn2.sandvik.coromant.com/publications/c-1040-366corodrillde10brochure-pdf_en-us_a620ed58-4893-4856-b3e2-0e5e3cbf06db.pdf&fileName=C-1040-366%20CoroDrill%20DE10%20brochure-pdf_(en-us).pdf).
4. Shaw, M. C. (2005). *Metal cutting principles* (2nd ed.). Oxford University Press.
5. Palyvoda, Yu. Ye., Dyachun, A. Ye., & Leshchuk, R. Ya. (2019). *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky* [Tool materials, cutting modes, and technical standardization of machining]. Ternopilskiy natsionalnyi tekhnichnyi universytet imeni Ivana Puliuiua – Ternopil: Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
6. Mazur, M. P. (Ed.), Vnukov, Yu. M., Dobroskok, V. L., Zaloga, V. O., Novosyolov, Yu. K., & Yakubov, F. Ya. (2011). *Osnovy teorii rizannia materialiv* [Fundamentals of cutting theory] (2nd ed., revised and expanded). Novyi Svit–2000.
7. Hloba, O. V., Vovk, V. V., Krasnovyd, D. A., & Solodkyi, V. I. (2022). *Teoriia rizannia: Pidruchnyk dlia studentiv spetsialnosti 131 – Prykladna mekhanika*. [Cutting theory: Textbook for students of specialty 131 – Applied Mechanics]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Отримано 19.06.2025

UDC 621.91

Andriy Vasylenko¹, Olena Melnyk², Anatoly Subin³

¹student of the Department of Mechanical Engineering Technology
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: 37robota2021@gmail.com

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: melnyk.olena@lil.kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8667-4262>. **ResearcherID:** NGS-5051-2025

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: anatoliy.subin@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-5747-2397>. **ResearcherID:** AAC-5786-2022

ALGORITHM FOR CALCULATING CONDITIONS FOR AXIAL CUTTING TOOLS

In modern mechanical engineering production, machining by cutting remains a key technological process due to its versatility and ability to process a wide range of materials. In the context of rapid advancements in information technologies, particularly the adoption of computer numerical control (CNC) machines and artificial intelligence systems, the optimization of cutting conditions has gained significant importance. This contributes to increased productivity, reduced financial and time costs, and ensures high processing quality. A crucial aspect is the integration of these technologies within the framework of CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support), which involves creating a unified information model of a product across all stages of its life cycle—from design to disposal. CALS technologies enable data standardization, facilitating efficient information integration and data continuity in the processes of design, production, logistics, repair, and after-sales service.

Research aimed at improving methods for predicting and optimizing cutting conditions is critical for enhancing the efficiency of mechanical engineering production in the context of digital transformation. Particular attention is given to the machining of holes using axial cutting tools, where the accuracy of selecting cutting conditions directly impacts the quality and cost-effectiveness of the process. The study presents a generalized algorithm for the operation of software developed for the automated calculation of optimal cutting conditions. This algorithm takes into account technological parameters, material and tool characteristics, as well as requirements for accuracy and productivity. The implementation of such solutions enhances the competitiveness of production, reduces costs, and supports the sustainable development of the industry.

Keywords: axial tool; machining sequence; blade machining; axial blade tool; drill; cutting modes during drilling.

Fig.: 2. References: 7.

РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-171-184](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-171-184)

УДК 681.518:004.93

**Анатолій Степанович Довбиш¹, Микита Ігорович Мироненко²,
Микита Костянтинівич Супруненко³, Сергій Олександрович Ковалевський⁴,
Михайло Сергійович Отрощенко⁵**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: a.dovbysh@cs.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1829-3318>

²доктор філософії, асистент кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5005-1672>

³аспірант кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: mykyta.suprunenko@cs.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8342-3003>

⁴аспірант кафедри комп'ютерних наук,

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: Kovalevskiy@ms.sumdu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-7913>

⁵аспірант кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: m.otroshenko@ias.sumdu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5064-6780>

ГЛИБОКЕ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНЕ МАШИННЕ НАВЧАННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ БІОСИГНАЛІВ

Метою дослідження є підвищення точності машинного навчання системи розпізнавання електроміографічних біосигналів для керування протезом кисті руки. Запропоновано в межах функціонального підходу до моделювання когнітивних процесів природного інтелекту метод ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання за декурсивною бінарною структурою даних. Метод дозволяє багатокласове машинне навчання звести до двохкласового для кожної страти декурсивного дерева, що є необхідною умовою побудови високостовірних вирішувальних правил. Оптимізація параметрів машинного навчання здійснюється за модифікованим авторами критерієм Кульбака. За результатами машинного навчання побудовано високостовірні вирішувальні правила для розпізнавання восьми основних жестів кисті руки.

Ключові слова: інформаційно-екстремальне машинне навчання; електроміографічний сигнал; інформаційний критерій; оптимізація; декурсивне бінарне дерево; протез кисті руки.

Рис.: 4. Бібл.: 11.

Актуальність теми дослідження. Незважаючи на значну кількість досліджень із вдосконалення взаємодії особи з інвалідністю з протезом кінцівки, зручність, функціональність та поширеність активних протезів у побуті все ще залишається на невисокому рівні. Основний напрям розвитку протезів руки забезпечується на базі електроміографії, як методу аналізу природних керуючих імпульсів нервової системи. Водночас необхідною умовою підвищення точності системи розпізнавання електроміографічних сигналів (ЕМГ-сигналів), які реєструють електричну активність м'язів руки при виконанні когнітивних команд на відповідні жести, є наявність релевантного вхідного математичного опису та методу машинного навчання з високою функціональною ефективністю. Якщо для формування вхідного математичного опису розроблено широкую номенклатуру комп'ютерно-інтегрованих ЕМГ-сенсорів з фільтрацією і нормалізацією ЕМГ-сигналів, то розроблення методів машинного навчання з високою точністю і оперативністю прийняття класифікаційних рішень все ще залишається проблематичним. Для розроблення високоточного та оперативного методу машинного навчання необхідно подолати ускладнення науково-методологічного характеру, основними з яких є довільні умови формування ЕМГ-сигналів і перетин у просторі ознак класів розпізнавання, які характеризують біосигнали відповідних рухів протеза. Тому підвищення функціональної ефективності машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів є актуальним завданням.

Мета дослідження. Дослідження спрямовано на підвищення функціональної ефективності машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів для керування протезом кисті руки в рамках інформаційно-екстремальної інтелектуальної технології (ІЕІ-технології) аналізу даних, яка базується на максимізації інформаційної спроможності системи у процесі її машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз електричних біоімпульсів, які є реакцією волокон м'язів руки на когнітивні команди на виконання відповідних рухів протеза, розглядається у протезуванні в межах інвазивного та неінвазивного підходів [1]. Протез з інвазивною системою зчитування біосигналів забезпечує більш точну їх реєстрацію через меншу зашумленість ЕМГ-сигналів, але потребує хірургічного втручання для імплантації ЕМГ-сенсорів та залишає ризик їх відторгнення [2, 3]. Значно зручніший у використанні неінвазивний метод, який полягає в реєстрації біоімпульсів з волокон м'язів руки, проте ЕМГ-сигнал містить шуми та артефакти, що ускладнює його розпізнавання, а відповідно і формування команди на виконавчий пристрій протеза [4; 5]. У працях [5; 6] вказується на складність вирішення проблеми розпізнавання рухів пальців руки, оскільки вони використовують спільні групи м'язів і тому їх ЕМГ-сигнали мають значний перетин у просторі ознак розпізнавання. Для підвищення точності рухів протеза застосовуються тактильні сенсори [7], які мають зворотний зв'язок із системою керування протезом, але вони не вирішують проблему розпізнавання ЕМГ-сигналів. У працях [8; 9] пропонується використовувати для розпізнавання ЕМГ-сигналів штучні нейронні мережі. Недоліками такого біонічного структурного підходу є негнучкість штучних нейронних мереж до перенавчання при збільшенні кількості класів розпізнавання, необхідність великої кількості зразків ЕМГ-сигналів для досягнення прийнятної точності машинного навчання та велика тривалість машинного навчання. Водночас збільшення кількості класів розпізнавання одночасно збільшує ступінь їх перетину в незмінному просторі ознак розпізнавання, що негативно впливає на точність машинного навчання. У працях [10; 11] для розпізнавання ЕМГ-сигналів розглядається метод інформаційно-екстремального машинного навчання за ієрархічною структурою даних у вигляді декурсивного бінарного дерева. Водночас реалізований у цих працях базовий алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання другого рівня глибини не дозволяє отримати високу точність класифікаційних рішень. Тому актуальною задачею для підвищення точності машинного навчання є розроблення методу глибокого інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів за декурсивною бінарною структурою даних, що є предметом дослідження, результати якого викладено у статті.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Додаткового дослідження потребує вплив параметрів машинного навчання, що оптимізуються, на точність класифікаційних рішень, автоматизація побудови декурсивного бінарного дерева для заданої абетки класів розпізнавання та методи формування вхідного математичного опису системи розпізнавання ЕМГ-сигналів, що навчається.

Постановка проблеми. Розглянемо формалізовану постановку задачі інформаційного синтезу здатної навчатися системи розпізнавання ЕМГ-сигналів. Нехай дано абетку $\{X_m^o \mid m = \overline{1, M}\}$ класів розпізнавання, які характеризують ЕМГ-сигнали на виконання різних жестів кисті руки. У процесі ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання необхідно:

1. Для заданої абетки класів розпізнавання, побудувати ієрархічну структуру даних у вигляді декурсивного бінарного дерева $\{X_{m,s,h}^o \mid s = \overline{1, 2}; h = \overline{1, H_{\max}}\}$, де $X_{m,s,h}^o$ – клас розпізнавання s -ї страти h -го ярусу декурсивного дерева.

2. Згідно з концепцією ІЕІ-технології в процесі машинного навчання його параметри оптимізуються в бінарному просторі ознак Геммінга. Нехай, наприклад, для класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$ задано параметри машинного навчання у вигляді структурованого вектора:

$$g_{s,h} = \langle d_{m,s,h}; \delta_{s,h}; \{\delta_{m,s,h,i} \mid i=1, N\} \rangle, \quad (1)$$

де $d_{m,s,h}$ – радіус гіперсферичного контейнера класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$, який відноблюється в процесі машинного навчання в радіальному базисі простору Геммінга;

$\delta_{s,h}$ – параметр, значення якого дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання;

$\delta_{m,s,h,i}$ – параметр, який дорівнює половині симетричного поля контрольних допусків i -ої ознаки реалізації класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$.

На параметри машинного навчання задано обмеження:

а) $d_{m,s,h} < d(x_{m,s,h} \oplus x_{c,s,h})$, де $d(x_{m,s,h} \oplus x_{c,s,h})$ – міжцентрова кодова відстань між усередненою двійковою реалізацією $x_{m,s,h}$ і аналогічною реалізацією $x_{c,s,h}$ сусіднього у страті класу розпізнавання $X_{c,s,h}^o$;

б) $\delta_{s,h} \in [0; \delta_H / 2]$, де δ_H – нормоване поле допусків на ознаки розпізнавання, яке визначає область значень контрольних допусків.

Оскільки усереднена реалізація $x_{m,s,h}$ залежить від параметра поля контрольних допусків, то в процесі машинного навчання оптимізуються інші три параметри. Отже, вектор (1) задає третій рівень глибини інформаційно-екстремального машинного навчання.

3. Оптимізувати параметри вектора (1) шляхом пошуку глобального максимуму усередненого за абеткою класів розпізнавання s -ї страти h -го ярусу інформаційного критерію в робочій області визначення його функції:

$$\bar{E}_{s,h} = \frac{1}{2} \sum_{m_s=1}^2 \max_{G_E \cap G_d} E_{m,s,h}(d), \quad (2)$$

де $E_{m,s,h}(d)$ – значення інформаційного критерію, обчислене для поточного радіуса контейнера класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$;

G_E – робоча (допустима) область визначення інформаційного критерію;

G_d – допустима область значень радіусів контейнерів класів розпізнавання.

4. За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання побудувати високостовірні вирішувальні правила.

5. На етапі функціонального тестування перевірити точність машинного навчання за реалізаціями навчальної матриці класів розпізнавання і ухвалити рішення про необхідність додаткових параметрів.

Таким чином, задача інформаційного синтезу здатної навчатися системи розпізнавання ЕМГ-сигналів полягає в оптимізації параметрів машинного навчання, заданих вектором (1), шляхом пошуку в процесі інформаційно-екстремального машинного навчання глобального максимуму інформаційного критерію (2).

Виклад основного матеріалу. Функціональну категорійну модель (ФКМ) ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів представимо у вигляді орієнтованого графа, ребрами якого є оператори відображення задіяних у процесі машинного навчання множин одна на одну. Водночас вхідний математичний опис ФКМ розглянемо у вигляді структури

$$I_{ex} = \langle W, T, \Omega, Z, Y_f^{[M]}, Y^{[M]}, H, \{Y_{s,h}^{[2]}\}, \{X_{s,h}^{[2]}\}; g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 \rangle,$$

де W – множина факторів, які впливають на систему розпізнавання ЕМГ-сигналів;

T – множина моментів часу зняття інформації;

Ω – простір ознак розпізнавання;

Z – абетка класів розпізнавання;

$Y_f^{[M]}$ – множина відфільтрованих біосигналів, $M = \text{Card } Y_f^{[M]}$;

$Y^{[M]}$ – вхідна навчальна матриця;

H – декурсивне бінарне дерево;

$\{Y_{s,h}^{[2]}\}$ – вхідна навчальна матриця класів розпізнавання s -ї страти h -го ярусу декурсивного дерева;

$\{X_{s,h}^{[2]}\}$ – задана в просторі Геммінга робоча бінарна навчальна матриця класів розпізнавання s -ї страти h -го ярусу декурсивного дерева;

g_1 – оператор фільтрації біосигналів, отриманих з джерела інформації, яке представляється у вигляді декартового добутку $W \times T \times \Omega \times Z$;

g_2 – оператор формування вхідної навчальної матриці $Y^{[M]}$;

g_3 – оператор побудови декурсивного бінарного дерева;

g_4 – оператор формування вхідних навчальних матриць класів розпізнавання страт декурсивного дерева;

g_5 – оператор формування бінарних навчальних матриць класів розпізнавання страт декурсивного дерева.

На рис. 1 представлено ФКМ інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів з оптимізацією параметрів, заданих вектором (1).

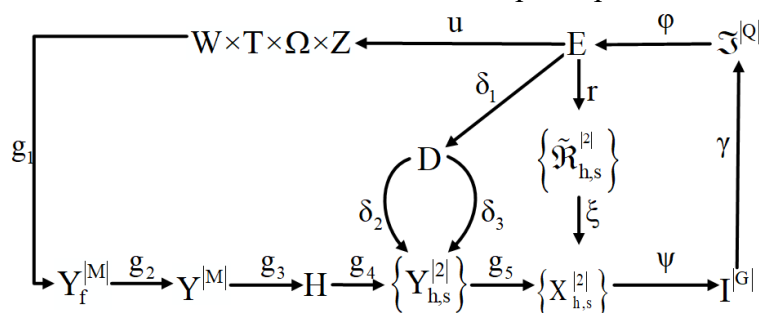


Рис. 1. Функціональна категорійна модель ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання третього рівня глибини
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 1 терм-множина E , елементами якої є значення інформаційного критерію оптимізації, обчислені на кожному кроці машинного навчання, є загальною для всіх контурів оптимізації. Оператор r відновлює в радіальному базисі простору ознак Геммінга гіперсферичні контейнери класів розпізнавання, які утворюють у загальному випадку для кожної s -ї страти h -го ярусу декурсивного бінарного дерева нечітке розбиття $\tilde{\mathfrak{R}}_{s,h}^{[2]}$ простору ознак. Оператор ξ покриває двійкові реалізації навчальних матриць $\{X_{s,h}^{[2]}\}$ кожної страти декурсивного дерева, а оператор Ψ перевіряє основну статистичну гіпотезу про належність двійкової реалізації класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$. Оператор γ формує множину $X_{m,s,h}^o$ точнісних характеристик, а оператор ϕ обчислює значення терм-множини

Е. Отже, контур вище названих операторів оптимізує геометричні параметри гіперсферичних контейнерів класів розпізнавання.

Контур оптимізації контрольних допусків замикається через терм-множину D , елементами якої є значення параметра поля контрольних допусків. Оператор δ_1 на кожному кроці машинного навчання обирає нове значення параметра поля контрольних допусків. Водночас оператор δ_2 обчислює контрольні допуски на всі ознаки розпізнавання, що дозволяє здійснювати їх паралельну оптимізацію. Оператор δ_3 запускає послідовну оптимізацію параметра $\delta_{m,s,h,i}$ поля контрольних допусків, які обчислює на кожному кроці машинного навчання для i -ї ознаки класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$. Оператор u регламентує процес машинного навчання.

Таким чином, ФКМ (рис. 1) можна розглядати як графічну структуру алгоритму ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів третього рівня глибини.

Згідно з ФКМ (рис. 1) повний алгоритм ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМ-сигналів за декурсивною бінарною структурою передбачає паралельно-послідовну оптимізацію контрольних допусків ознак розпізнавання. Водночас згідно з принципом відкладених рішень спочатку реалізується алгоритм машинного навчання з паралельною оптимізацією контрольних допусків за двохциклічною процедурою

$$\delta_{s,h}^* = \arg \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E \cap G_d} \bar{E}_{s,h}(d) \}, \quad (3)$$

де $\bar{E}_{s,h}(d)$ – значення усередненого інформаційного критерію оптимізації, обчислене при поточному радіусі d контейнерів класів розпізнавання s -ої страти h -го ярусу декурсивного дерева;

G_δ – область допустимих значень параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання.

Якщо за результатами паралельної оптимізації контрольних допусків значення інформаційного критерію (2) є недостатньо високими, то для класів розпізнавання відповідної страти реалізується алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання з послідовною оптимізацією контрольних допусків за процедурою:

$$\{\delta_{m,s,h,i}^* \mid i = \overline{1, N}\} = \arg \bigotimes_{l=1}^L \max_{G_{\delta l}} \{ \max_{G_\delta} \{ \max_{G_E \cap G_d} \bar{E}_{s,h}(d) \} \}, \quad (4)$$

де $\bigotimes_{l=1}^L$ – символ операції повторення процедури (4).

У процедурі (4) $G_{\delta l} = G_\delta$.

Для підвищення оперативності алгоритму машинного навчання з послідовною оптимізацією як стартові приймаються контрольні допуски, отримані за результатами їх паралельної оптимізації.

Основними етапами ієрархічного інформаційно-екстремального машинного навчання за декурсивною структурою даних є:

- 1) формування варіаційного ряду класів розпізнавання за збільшенням кодової міжцентрової відстані відносно обраного класу розпізнавання;
- 2) побудова ієрархічної структури даних у вигляді декурсивного бінарного дерева;

3) оптимізація параметрів машинного навчання за двохциклічною процедурою (3) для класів розпізнавання кожної страти декурсивного дерева;

4) аналіз результатів машинного навчання та прийняття рішення про необхідність збільшення його глибини за процедурою (4);

5) побудова для кожної страти декурсивного дерева вирішувальних правил за отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання;

6) функціональне тестування з метою оцінки точності вирішувальних правил і ухвалення рішення про достатність обраного рівня глибини машинного навчання.

Варіаційний ряд формується шляхом пошуку для обраного класу розпізнавання найближчого сусіда із заданої абетки. Після вилучення обраного класу розпізнавання з абетки для його найближчого сусіда аналогічно знаходиться із залишкової абетки свій найближчий сусід і так далі для всіх класів розпізнавання.

Для побудови декурсивного бінарного дерева варіаційний ряд поділяється приблизно порівну на дві групи, які визначають відповідно дві гілки дерева. Як атрибути вершин верхнього (першого за дендрографічною класифікацією) ярусу декурсивного дерева вибираються навчальні матриці межових класів розпізнавання кожної групи. Потім атрибути страти верхнього ярусу переносяться у вершини відповідних страт нижнього ярусу. Страти нижніх ярусів кожної гілки дерева містять, крім транспортованої з верхнього ярусу навчальної матриці, також навчальну матрицю найближчого сусіднього в своїй групі класу розпізнавання. Побудова дерева продовжується доти, поки не будуть сформовані страти, які містять навчальні матриці всіх класів розпізнавання.

Таким чином, декурсивне бінарне дерево розбиває задану абетку класів розпізнавання на страти, кожна з яких містить по два найближчих сусідніх класи розпізнавання, що дозволяє для них застосовувати алгоритм інформаційно-екстремального двохкласового машинного навчання. Якщо побудовані вирішувальні правила не забезпечують безпомилковість розпізнавання реалізацій з навчальної матриці, то необхідно згідно з принципом відкладених рішень збільшити рівень глибини машинного навчання шляхом оптимізації додаткових параметрів функціонування системи розпізнавання ЕМГ-сигналів.

Розглянемо алгоритм двохкласового машинного навчання для класів розпізнавання кожної страти декурсивного дерева згідно з процедурою (3). Вхідними даними є тривимірний масив вхідної навчальної матриці $\{y_{m,s,h}\}$ для класів розпізнавання s -ї страти h -го ярусу декурсивного дерева та нормоване поле δ_H допусків на ознаки розпізнавання.

Нехай для страти, де знаходяться класи розпізнавання $X_{1,s,h}^o$ і $X_{2,s,h}^o$, клас $X_{1,s,h}^o$ приймемо як допусковий, відносно якого задається система контрольних допусків на ознаки розпізнавання. Тоді алгоритм двохкласового машинного навчання можна реалізувати за такими основними етапами:

- 1) обнулення лічильника зміни параметра $\delta_{s,h}$: $\delta := 0$;
- 2) ініціалізація лічильника зміни параметра $\delta_{s,h}$: $\delta_{s,h} = \delta_{s,h} = 1$;
- 3) обнулення лічильника класів розпізнавання: $m := 0$;
- 4) ініціалізація лічильника класів розпізнавання: $m := m + 1$;
- 5) обчислення усередненої реалізації $y_{1,s,h}$ навчальної матриці класу розпізнавання $X_{1,s,h}^o$;
- 6) обчислення для кожної i -ї ознаки усередненої реалізації $y_{1,s,h}$ нижнього $A_{HK,i}$ і верхнього $A_{BK,i}$ контрольних допусків на ознаки розпізнавання за формулами

$$A_{HK,i} = y_{1,s,h,i} - \delta; \quad A_{BK,i} = y_{1,s,h,i} + \delta;$$

7) формування масиву $\{x_{m,s,h,i}^{(j)}\}$ робочої бінарної навчальної матриці для класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$, елементи якої визначаються за правилом

$$x_{m,s,h,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } A_{HK,i} \leq y_{m,s,h,i}^{(j)} \leq A_{BK,i}; \\ 0, & \text{if else,} \end{cases};$$

8) обчислення усередненої двійкової реалізацій $x_{m,s,h}$, елементи якої визначаються за правилом (6.1):

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{J_{\max}} x_{m,i}^{(j)} > Ro; \\ 0, & \text{if else;} \end{cases}$$

де Ro – рівень селекції координат двійкової реалізації, який за замовчуванням дорівнює 0,5;

9) якщо $m < 2$, то виконується пункт 2, інакше – пункт 8.

10) обнулення лічильника класів розпізнавання: $m := 0$.

11) ініціалізація лічильника класів розпізнавання: $m := m + 1$.

12) обнулення лічильника кроків зміни радіуса контейнера класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$: $d_{m,s,h} := 0$.

13) ініціалізація лічильника кроків зміни радіуса гіперсферичного контейнера класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$: $d_{m,s,h} := d_{m,s,h} + 1$.

14) обчислення інформаційного критерію $E_{m,s,h}(d)$;

15) якщо $d_{m,s,h} < d(x_{1,s,h} \oplus x_{2,s,h})$, то виконується пункт 11, інакше – пункт 16;

16) якщо $m < 2$, то виконується пункт 9, інакше – пункт 17;

17) якщо $\delta_{s,h} < \delta_H$, то виконується пункт 2, інакше – пункт 18;

18) обчислюється усереднене значення інформаційного критерію $E_{m,s,h}(d)$, здійснюється пошук його глобального максимального значення та визначаються оптимальні параметри машинного навчання $\delta_{s,h}^*$, $d_{1,s,h}^*$ і $d_{2,s,h}^*$;

19) ЗУПИН.

Як критерій оптимізації параметрів машинного навчання розглядалася модифікована авторами інформаційна міра Кульбака-Лейблера у вигляді

$$E_{m,s,h}(d) = \frac{1}{n_{\min}} \{K_{1,m,s,h}(d) - K_{2,m,s,h}(d)\} \log_2 \left\{ \frac{n_{\min} + K_{1,m,s,h}(d) - K_{2,m,s,h}(d) + 10^{-\lambda}}{n_{\min} - K_{1,m,s,h}(d) + K_{2,m,s,h}(d) + 10^{-\lambda}} \right\}, \quad (6)$$

де $K_{1,m,s,h}(d)$ – кількість реалізацій класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$, які правильно класифіковано при поточному радіусі його контейнера;

$K_{2,m,s,h}(d)$ – кількість реалізацій найближчого сусіда, які помилково було віднесено до класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$; $n_{\min}$ – мінімальний обсяг репрезентативної навчальної вибірки.

Нормована форма інформаційного критерію представляється як відношення критерію (6) до його максимального значення, яке він приймає при значеннях $K_{1,m,s,h}(d) = n_{\min}$ і $K_{2,m,s,h}(d) = 0$.

За отриманими в процесі машинного навчання оптимальними геометричними параметрами контейнерів класів розпізнавання будуються вирішальні правила для розпізна-

вання ЕМГ-сигналів у режимах функціонального тестування та екзамену. Якщо за результатами випробувань підтверджується висока достовірність і оперативність вирішальних правил, то вони заносяться в пам'ять системи керування протезом і використовуються безпосередньо в робочому режимі.

Для гіперсферичного класифікатора вирішувальні правила мають вигляд

$$(\forall X_{m,s,h}^o \in \mathfrak{R}_{s,h}^{[2]})(\forall x_t \in \mathfrak{R}_{s,h}^{[2]}) \left[\begin{array}{l} \text{if } [(\mu_m > 0) \& (\mu_{m,s,h} = \max_{\{m_s\}} \{\mu_{ms,h}\})] \text{ then} \\ x_t \in X_{m,s,h}^o \text{ else } x_e \notin X_{m,s,h}^o \end{array} \right], \quad (7)$$

де x_t – тестова реалізація, що розпізнається;

$\mu_{m,s,h}$ – функція належності реалізації x_e до класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$.

Для гіперсферичного класифікатора функція належності $\mu_{m,s,h}$ має вигляд

$$\mu_{m,s,h} = 1 - \frac{d(x_e \oplus x_{m_s,s,h}^*)}{d_{m_s,s,h}^*}, \quad (8)$$

де $d(x_e \oplus x_{m_s,s,h}^*)$ – кодова відстань Геммінга між реалізацією x_e і оптимальною усередненою реалізацією $x_{m_s,s,h}^*$ класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$;

$d_{m_s,s,h}^*$ – оптимальний радіус контейнера класу розпізнавання $X_{m,s,h}^o$.

Вирішувальні правила, побудовані в межах геометричного підходу відрізняються високою оперативністю ухвалення класифікаційних рішень, що є критичним показником при виконанні когнітивних команд на відповідні рухи протеза.

Результати. Реалізація розглянутого вище алгоритму здійснювалася на прикладі машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів на виконання восьми рухів протеза кінцівки руки:

- нерухомий протез (клас розпізнавання X_1^o);
- згинання в кулак (клас розпізнавання X_2^o);
- згинання променево-зап'ясткового суглоба (клас розпізнавання X_3^o);
- розгинання променево-зап'ясткового суглоба (клас розпізнавання X_4^o);
- щипок вказівного і великого пальців (клас розпізнавання X_5^o);
- щипок середнього і великого пальців (клас розпізнавання X_6^o);
- щипок безіменного і великого пальців (клас розпізнавання X_7^o);
- щипок ознак розпізнавання ознак розпізнавання мізинця і великого пальця (клас розпізнавання X_8^o).

Кожна реалізація ЕМГ-сигналу складалася з 2400 ознак розпізнавання, які вимірялися на часовому інтервалі 3 секунди.

Варіаційний ряд, побудований за збільшенням міжкласової відстані відносно класу розпізнавання X_1^o , мав наступну структуру:

$$\langle X_1^o, X_3^o, X_7^o, X_8^o, X_6^o, X_5^o, X_4^o, X_2^o \rangle. \quad (9)$$

Після поділу порівню варіаційного ряду (9) на дві групи було побудовано для заданої абетки класів розпізнавання декурсивне бінарне дерево (рис. 2). У страті першому ярусу декурсивного дерева розміщено два межеві класи розпізнавання X_8^o і X_6^o , які утворюють відповідно дві гілки дерева.

Для кожної страти декурсивного дерева було реалізовано двохкласове інформаційно-екстремальне машинне навчання з оптимізацією контрольних допусків на ознаки розпізнавання за процедурою (3).

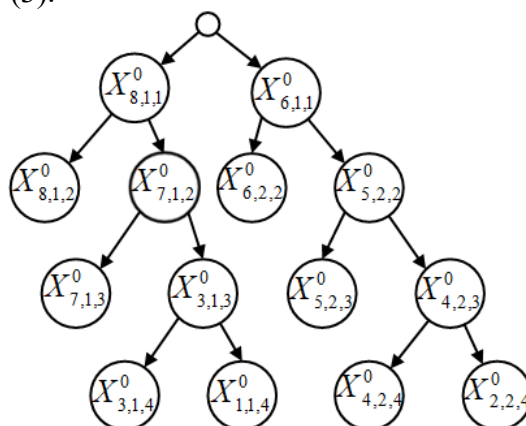
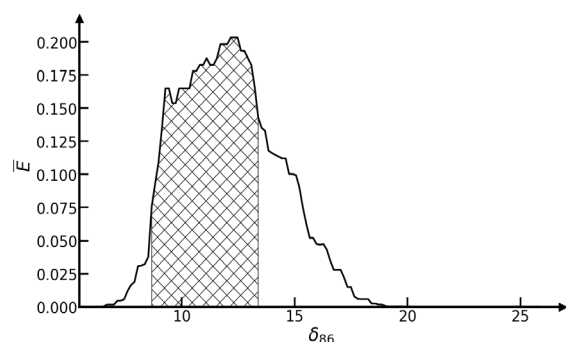


Рис. 2. Декурсивне бінарне дерево

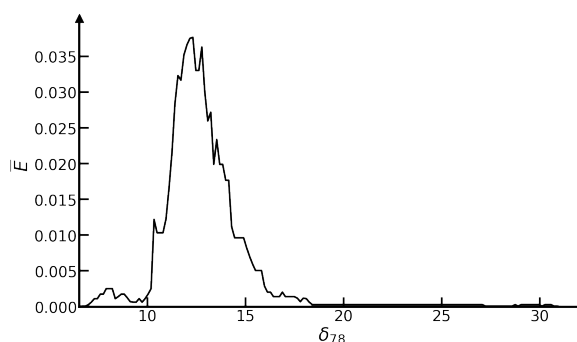
Джерело: розроблено авторами.

На рис. 3, *a–ж*, показано графіки залежності нормованого інформаційного критерію (5) від параметра $\delta_{s,h}$ поля контрольних допусків на ознаки класів розпізнавання.

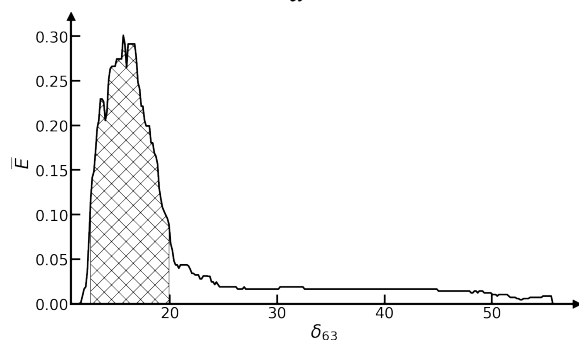
Аналіз графіків на рисунках 3, *д і 3, е*, показує, що для класів розпізнавання цих страт інформаційний критерій оптимізації досягає свого максимального граничного значення, що дозволяє побудувати безпомилкові за навчальною матрицею вирішувальні правила. Водночас аналіз рис. 3, *б*, показує, що на графіку після реалізації базової процедури (3) відсутня робоча область, що робить класи розпізнавання першої страти другого ярусу неподільними, оскільки помилки першого та другого роду перебільшують відповідно першу та другу достовірності. Також невисоку точність машинного навчання отримано для класів розпізнавання другої страти другого ярусу та першої страти третього ярусу. З метою підвищення точності для цих класів розпізнавання необхідно збільшити рівень глибини машинного навчання.



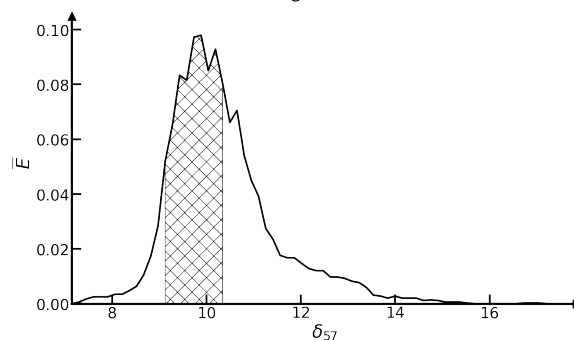
a



б



в



г

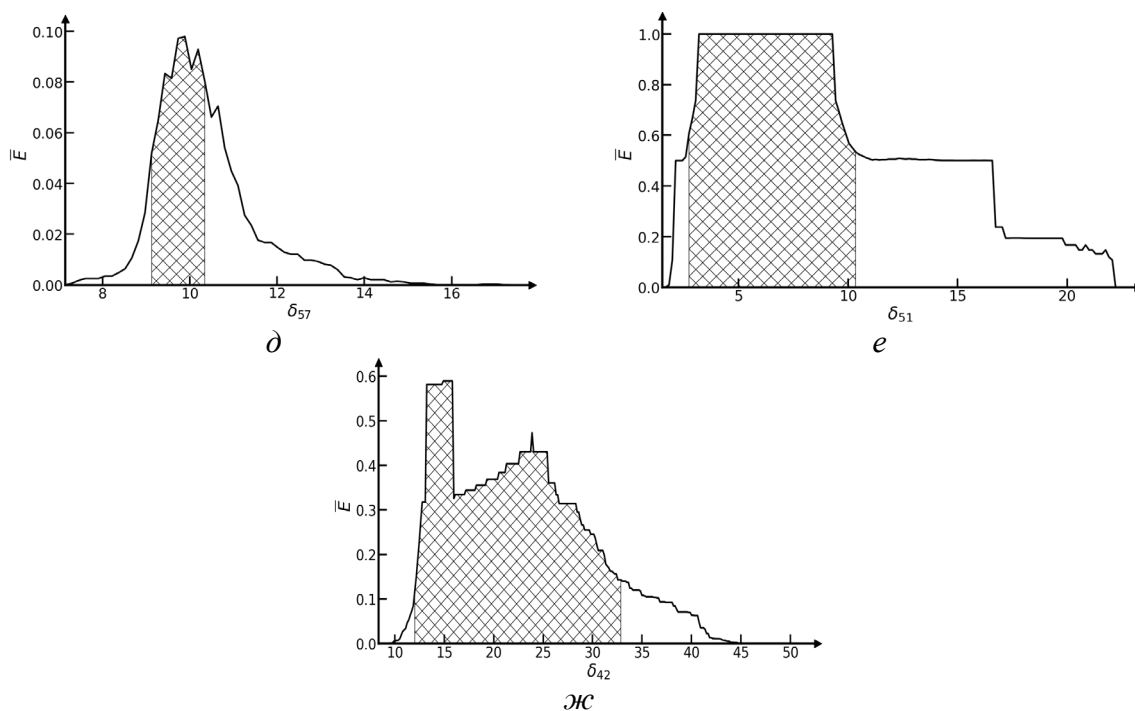


Рис. 3. Графіки залежності критерію (5) від параметра поля контрольних допусків на ознаки розпізнавання: а – страта першого ярусу; б – перша страта другого ярусу; в – друга страта другого ярусу; г – перша страта третього ярусу; д – друга страта третього ярусу; е – перша страта четвертого ярусу; ж – друга страта четвертого ярусу

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4, а–в, показано графіки нормованого інформаційного критерію (5), отримані за результатами послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання за процедурою (4).

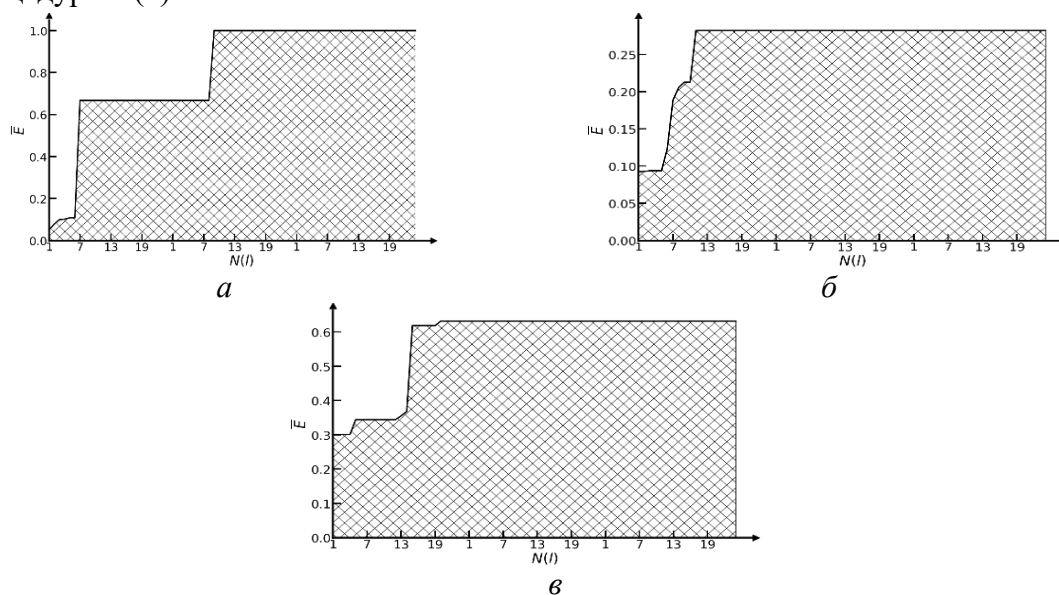


Рис. 4. Графіки зміни інформаційного критерію в процесі послідовної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання класів розпізнавання: а – перша страта другого ярусу; б – друга страта другого ярусу; в – перша страта третього ярусу

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз рис. 4 показує суттєве підвищення максимального значення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання в порівнянні з результатами, отриманими при машинному навчанні другого рівня глибини за ітераційною процедурою (3).

За результатами інформаційно-екстремального машинного навчання для побудови вирішувальних правил (7) було отримано такі оптимальні радіуси контейнерів класів розпізнавання: $d_1^* = 861$ (тут і далі в тексті в кодових одиницях) для класу розпізнавання X_1^o ; $d_2^* = 1032$ для класу розпізнавання X_2^o ; $d_3^* = 915$ для класу розпізнавання X_3^o ; $d_4^* = 1129$ для класу розпізнавання X_4^o ; $d_5^* = 990$ для класу розпізнавання X_5^o ; $d_6^* = 957$ для класу розпізнавання X_6^o ; $d_7^* = 379$ для класу розпізнавання X_7^o і $d_8^* = 394$ для класу розпізнавання X_8^o .

Обговорення. Відносно невисоке значення інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання після реалізації базового алгоритму інформаційно-екстремального машинного навчання за процедурою (3) свідчить про наявність суттєвого перетину в просторі ознак класів розпізнавання відповідних страт декурсивного дерева. Винятком є класи розпізнавання першої страти четвертого ярусу (рис. 3, *e*), де нормований інформаційний критерій при оптимальному параметрі поля контрольних допусків досягає свого максимального граничного значення. Збільшення глибини інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів за послідовною ітераційною процедурою (4) дозволило суттєво підвищити величину інформаційного критерію оптимізації параметрів машинного навчання. Оскільки критерій (5) є адитивним до першої та другої достовірностей, то цей факт свідчить і про підвищення точності машинного навчання.

Відомо, що паралельна оптимізація параметрів машинного навчання характеризується високою його оперативністю, але, як це показано приведеними в статті експериментальними результатами, невисокою точністю. Послідовна оптимізація параметрів машинного навчання навпаки підвищує точність машинного навчання, але зменшує його оперативність. Тому використання отриманих за результатами паралельної оптимізації контрольних допусків на ознаки розпізнавання як стартових при послідовній оптимізації підвищує її оперативність. Цей факт пояснюється тим, що при послідовній оптимізації контрольних допусків визначення функції інформаційного критерію відбувається в робочій (допустимій) області, де перша та друга достовірності перебільшують відповідно помилки першого та другого роду.

Особливістю інформаційно-екстремального машинного навчання за декурсивною структурою даних є наявність того самого класу розпізнавання у двох стратах різних ярусів декурсивного дерева. Тому при побудові для кожного класу розпізнавання вирішувальних правил необхідно згідно з мінімально дистанційним принципом машинного навчання за оптимальний радіус контейнера класу розпізнавання обирати його мінімальне значення. Крім того, варто звернути увагу на випадок, коли на графіку залежності інформаційного критерію від параметра оптимізації існує ділянка типу “плато” при максимальному значенні критерію як це видно на рис. 3, *e*. У цьому випадку для визначення оптимального параметра оптимізації необхідно з екстремальних його значень обрати таке, яке мінімізує так зване мінімально дистанційне відношення усередненого за двома класами розпізнавання значення їхніх радіусів до міжцентрової кодової відстані.

Головною задачею інформаційно-екстремального машинного навчання є отримання максимального граничного значення усередненого за стратами декурсивного дерева інформаційного критерію оптимізації, як це досягнуто при машинному навчанні класів розпізнавання першої страти другого ярусу та першої страти четвертого ярусу. Тому наступною задачею дослідження для підвищення середнього значення інформаційного критерію згідно з принципом відкладених рішень є збільшення рівня глибини машинного навчання шляхом оптимізації додаткових параметрів, які впливають на точнісні характеристики класифікаційних рішень.

Висновки. Запропоновано метод глибокого інформаційно-екстремального машинного навчання системи розпізнавання ЕМГ-сигналів, який для восьми класів розпізнавання дозволив отримати побудовані в рамках геометричного підходу високдостовірні

вирішувальні правила. Крім того, перевагами методу в порівнянні з відомими інтелектуальними інформаційними технологіями аналізу даних, включаючи штучні нейронні мережі, є його гнучкість до перенавчання при збільшенні потужності абетки класів розпізнавання, практична інваріантність вирішувальних правил до багатовимірності простору ознак і висока оперативність прийняття класифікаційних рішень. Запропонований метод також вирішує проблему багатовимірності абетки класів розпізнавання шляхом використання декурсивної бінарної структури даних, що дозволяє багатокласове машинне навчання за лінійною структурою даних звести до двохкласового, створюючи необхідні умови отримання високої точності розпізнавання ЕМГ-сигналів.

Для підвищення отриманої точності машинного навчання необхідно збільшення його глибини шляхом оптимізації додаткових параметрів, включаючи параметри формування вхідного математичного опису системи розпізнавання ЕМГ-сигналів.

Список використаних джерел

1. Svensson, P., Wijk, U., Björkman, A., & Antfolk, C. (2017). A review of invasive and non-invasive sensory feedback in upper limb prostheses. *Expert Review of Medical Devices*, 14(6), 439–447. <https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1332989>.
2. Salminger, S., Stino, H., Pichler, L. H., Gstoettner, C., Sturma, A., Mayer, J. A., Szivak, M., & Aszmann, O. C. (2022). Current rates of prosthetic usage in upper-limb amputees – Have innovations had an impact on device acceptance? *Disability and Rehabilitation*, 44(14), 3708–3713. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1866684>.
3. Stango, A., Negro, F., & Farina, D. (2015). Spatial correlation of high density EMG signals provides features robust to electrode number and shift in pattern recognition for myoelectric control. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(2), 189–198. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2366752>.
4. Sattar, N. Y., Kausar, Z., Usama, S. A., Farooq, U., & Khan, U. S. (2021). EMG based control of transhumeral prosthesis using machine learning algorithms. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(10), 3522–3532. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-1058-5>.
5. Abbaspour, S., Lindén, M., Gholamhosseini, H., Naber, A., & Ortiz-Catalan, M. (2020). Evaluation of surface EMG-based recognition algorithms for decoding hand movements. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(1), 83–100. <https://doi.org/10.1007/S11517-019-02073-Z>.
6. Roche, A. D., Rehbaum, H., Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Prosthetic myoelectric control strategies: A clinical perspective. *Current Surgical Reports*, 2(3), Article 44. <https://doi.org/10.1007/s40137-013-0044-8>.
7. Zhang, T., Jiang, L., & Liu, H. (2018). Design and functional evaluation of a dexterous myoelectric hand prosthesis with biomimetic tactile sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1391–1399. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2018.2844807>.
8. Atzori, M., Cognolato, M., & Müller, H. (2016). Deep learning with convolutional neural networks applied to electromyography data: A resource for the classification of movements for prosthetic hands. *Frontiers in Neurobotics*, 10, Article 9. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2016.00009>.
9. Fang, Y., Yang, J., Zhou, D., & Ju, Z. (2022). Modelling EMG driven wrist movements using a bio-inspired neural network. *Neurocomputing*, 470, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.10.104>.
10. Dovbysh, A. S., Piatachenko, V. Y., Myronenko, M. I., Suprunenko, M. K., & Simonovskiy, J. V. (2024). Hierarchical information-extreme machine learning of hand prosthesis control system based on decursive data structure. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), E1–E8. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).e1).
11. Suprunenko, M. K., Zborshchuk, O. P., & Sokolov, O. Yu. (2022). Information-extreme machine learning of wrist prosthesis control system based on the sparse training matrix. *Journal of Engineering Sciences*, 9(2), E28–E35. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(2\).e4](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).e4).

References

1. Svensson, P., Wijk, U., Björkman, A., & Antfolk, C. (2017). A review of invasive and non-invasive sensory feedback in upper limb prostheses. *Expert Review of Medical Devices*, 14(6), 439–447. <https://doi.org/10.1080/17434440.2017.1332989>.
2. Salminger, S., Stino, H., Pichler, L. H., Gstoettner, C., Sturma, A., Mayer, J. A., Szivak, M., & Aszmann, O. C. (2022). Current rates of prosthetic usage in upper-limb amputees – Have innovations had an impact on device acceptance? *Disability and Rehabilitation*, 44(14), 3708–3713. <https://doi.org/10.1080/09638288.2020.1866684>.

3. Stango, A., Negro, F., & Farina, D. (2015). Spatial correlation of high density EMG signals provides features robust to electrode number and shift in pattern recognition for myocontrol. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(2), 189–198. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2014.2366752>.
4. Sattar, N. Y., Kausar, Z., Usama, S. A., Farooq, U., & Khan, U. S. (2021). EMG based control of transhumeral prosthesis using machine learning algorithms. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 19(10), 3522–3532. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-1058-5>.
5. Abbaspour, S., Lindén, M., Gholamhosseini, H., Naber, A., & Ortiz-Catalan, M. (2020). Evaluation of surface EMG-based recognition algorithms for decoding hand movements. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(1), 83–100. <https://doi.org/10.1007/S11517-019-02073-Z>.
6. Roche, A. D., Rehbaum, H., Farina, D., & Aszmann, O. C. (2014). Prosthetic myoelectric control strategies: A clinical perspective. *Current Surgical Reports*, 2(3), Article 44. <https://doi.org/10.1007/s40137-013-0044-8>.
7. Zhang, T., Jiang, L., & Liu, H. (2018). Design and functional evaluation of a dexterous myoelectric hand prosthesis with biomimetic tactile sensor. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(7), 1391–1399. <https://doi.org/10.1109/tnsre.2018.2844807>.
8. Atzori, M., Cognolato, M., & Müller, H. (2016). Deep learning with convolutional neural networks applied to electromyography data: A resource for the classification of movements for prosthetic hands. *Frontiers in Neurobotics*, 10, Article 9. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2016.00009>.
9. Fang, Y., Yang, J., Zhou, D., & Ju, Z. (2022). Modelling EMG driven wrist movements using a bio-inspired neural network. *Neurocomputing*, 470, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.10.104>.
10. Dovbysh, A. S., Piatachenko, V. Y., Myronenko, M. I., Suprunenko, M. K., & Simonovskiy, J. V. (2024). Hierarchical information-extreme machine learning of hand prosthesis control system based on decursive data structure. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), E1–E8. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).e1).
11. Suprunenko, M. K., Zborshchuk, O. P., & Sokolov, O. Yu. (2022). Information-extreme machine learning of wrist prosthesis control system based on the sparse training matrix. *Journal of Engineering Sciences*, 9(2), E28–E35. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(2\).e4](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).e4).

Отримано 12.06.2025

UDC 681.518:004.93

**Anatolii Dovbysh¹, Mykyta Myronenko², Mykyta Suprunenko³, Serhii Kovalevskiy⁴,
Mykhailo Otroshchenko⁵**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Science
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: a.dovbysh@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1829-3318>

²PhD, Assistant of the Department of Computer Science
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: m.myronenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5005-1672>

³PhD student

Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: mykyta.suprunenko@cs.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-8342-3003>

⁴PhD student

Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: Kovalevskiy@ms.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1332-7913>

⁵PhD student

Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: m.otroshenko@ias.sumdu.edu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5064-6780>

DEEP INFORMATION-EXTREME MACHINE LEARNING FOR RECOGNITION OF ELECTROMYOGRAPHIC BIOSIGNALS

The aim of the study is to improve the accuracy of machine learning of the electromyographic signal (EMG) recognition system for controlling a hand prosthesis with a non-invasive biosignal reading system.

The information-extreme machine learning method is proposed, which is developed within the framework of the functional approach to modelling cognitive processes of building and making classification decisions by natural intelligence. This makes the method flexible when retraining the system in the case of expanding the alphabet of recognition classes.

To solve the multidimensionality problem of the recognition class alphabet, a hierarchical information-extreme machine learning algorithm based on the decursive data structure was developed and implemented. This data structure allows switching from multi-class machine learning to two-class machine learning for each stratum of the binary decursive tree when the number of recognition classes increases. Construction of highly accurate decision rules for the recognition classes of each stratum of the binary decomposition tree is carried out by optimising the machine learning parameters, the number of which determines the level of machine learning depth. As the criterion for optimising machine learning parameters, the authors use the Kullback information measure modified by the authors in the form of a functional of the accuracy characteristics.

Due to computer modelling, error-free decision rules for the alphabet with eight recognition classes, which characterise the EMG signals of the corresponding hand and finger movements, have been built using the training matrix.

Conclusions: It has been experimentally proved that when the number of recognition classes exceeds two, it is necessary to switch from a linear data structure to a hierarchical one in the form of a binary decursive tree.

Keywords: *information-extreme machine learning, electromyographic signal, information criterion, optimization, decursive binary tree, hand prosthesis.*

Fig.: 4. References: 11.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-185-195](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-185-195)

УДК 004.9

Василь Степанович Морохович¹, Антон Олександрович Смолен²¹кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та фізико-математичних дисциплін
ДВНЗ “Ужгородський національний університет” (Ужгород, Україна)E-mail: vs.mor75@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4939-6566>. ResearcherID: AAJ-6025-2021²студент

ДВНЗ “Ужгородський національний університет” (Ужгород, Україна)

E-mail: smolen.anton@student.uzhnu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9608-8258>

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ЗДОРОВОГО СПОСОБУ ЖИТТЯ

У сучасному суспільстві спостерігається стійке зростання попиту на цифрові інструменти, що сприяють формуванню здорового способу життя. У статті представлено розробку кросплатформного мобільного додатку для фізичних тренувань із використанням технології React Native та локального сховища AsyncStorage. Додаток дозволяє користувачам використовувати індивідуальні тренувальні плани, відстежувати фізичну активність, переглядати персональну статистику та налаштовувати профіль відповідно до фітнес-мети. Система характеризується адаптивністю, модульною архітектурою, автономністю та зручним інтерфейсом, що підвищує ефективність взаємодії користувача з додатком. У процесі розробки реалізовано логіку підбору тренувань, структуру локальної бази даних, а також тестування функціоналу для забезпечення стабільності роботи системи.

Ключові слова: фізичні тренування; здоровий спосіб життя; мобільний додаток; кросплатформні технології, проектування.

Рис.: 6. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. В умовах глобалізації та активного розвитку цифрових технологій питання формування здорового способу життя набуває особливої актуальності. Сучасне суспільство стикається з такими викликами, як малорухливий спосіб життя, незбалансоване харчування, високий рівень стресу та зниження загальної фізичної активності населення. Згідно з дослідженням, низький рівень фізичної активності є одним з провідних чинників ризику розвитку серцево-судинних захворювань, цукрового діабету, ожиріння та депресії [1].

На тлі цих проблем зростає роль цифрових рішень, зокрема мобільних додатків, які сприяють популяризації фізичної активності, контролю стану здоров'я та формуванню корисних звичок. Мобільні додатки для фізичних тренувань забезпечують користувачам доступ до персоналізованих програм, дозволяють відстежувати прогрес, формувати індивідуальні плани занять та інтегрувати дані з носимих гаджетів для комплексного моніторингу фізичного стану.

Разом із тим, аналіз ринку мобільних додатків свідчить про низку недоліків існуючих рішень. Багато додатків не враховують індивідуальні особливості користувачів, мають обмежену функціональність або не забезпечують належного рівня взаємодії з користувачем. Крім того, питання безпеки персональних даних та забезпечення конфіденційності залишаються актуальними.

Це зумовлює необхідність розробки інноваційних мобільних додатків, які поєднують сучасні технологічні рішення з ефективними методами залучення користувачів до активного способу життя. У цьому контексті особливого значення набуває використання кросплатформних технологій, таких як React Native, що дозволяють створювати функціональні та зручні у використанні мобільні застосунки з єдиною кодовою базою для різних операційних систем.

Таким чином, дослідження інноваційних аспектів використання мобільних додатків для формування здорового способу життя є актуальним та має важливе практичне значення для подальшого розвитку цифрових рішень у сфері фізичної активності та охорони здоров'я.

Постановка проблеми. В умовах стрімкого розвитку цифрових технологій значного поширення набули мобільні додатки для фітнесу, трекінгу активності та підтримки здорового способу життя. Вони пропонують користувачам зручні інструменти для моніторингу фізичної активності, формування звичок, контролю харчування та самопочуття. Однак аналіз існуючих рішень виявляє низку суттєвих проблем:

- недостатня персоналізація контенту: багато додатків не враховують індивідуальні особливості користувачів (рівень підготовки, стан здоров'я, фізіологічні параметри);
- відсутність інтеграції з сучасними носимими гаджетами (wearables) або її обмежена функціональність;
- слабка мотиваційна складова: механізми гейміфікації, системи досягнень, соціальні інтеракції реалізовані формально, без урахування психологічних чинників залучення користувачів;
- низький рівень адаптивності тренувальних програм до змін стану користувача у динаміці;
- проблеми з UX/UI – складний або перевантажений інтерфейс негативно впливає на користувацький досвід, особливо серед початківців.

Крім того, значна частина мобільних додатків зосереджена на вузькому функціоналі, тоді як комплексні рішення для всебічної підтримки здорового способу життя залишаються малопоширеними.

Відповідно, існує нагальна потреба у розробці інноваційних мобільних додатків, які поєднують персоналізований підхід, інтеграцію сучасних технологій (AI, IoT), продуману мотивацію та зручний інтерфейс. Такі рішення мають не лише забезпечувати користувачів засобами для активного життя, а й формувати стійкі звички, пов'язані зі здоровим способом життя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років спостерігається значне зростання інтересу до мобільних додатків, спрямованих на підтримку здорового способу життя. Згідно з даними Grand View Research, світовий ринок фітнес-додатків у 2024 році оцінювався в 10,59 мільярда доларів США, і прогнозується, що до 2030 року він досягне 23,21 мільярда доларів, демонструючи середньорічний темп зростання 13,88 % (рис. 1).

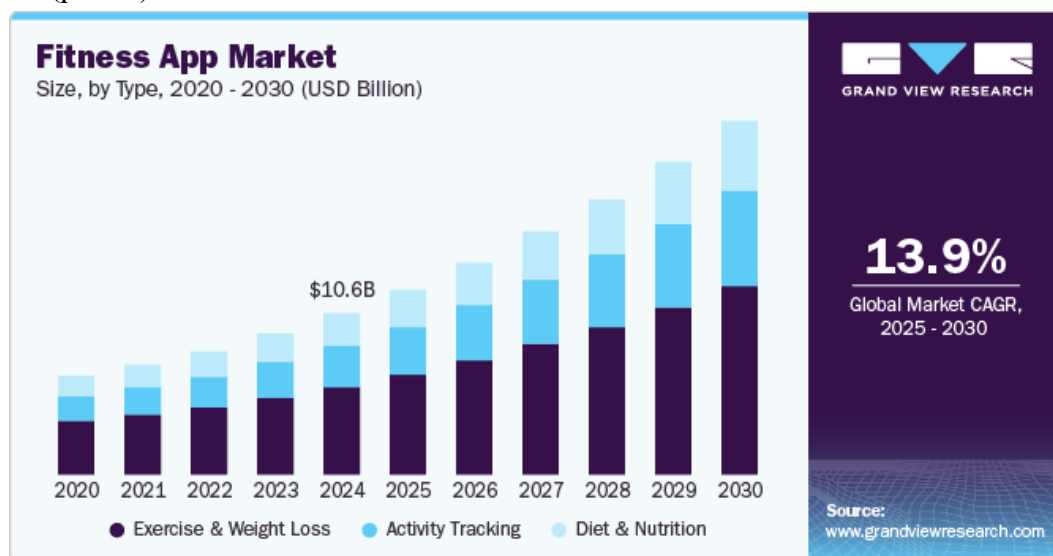


Рис. 1. Прогноз зростання ринку фітнес-додатків у 2020-2030 роках, млрд дол. США [2]

Сучасні фітнес-додатки пропонують користувачам широкий спектр функцій, включаючи персоналізовані тренувальні програми, відстеження фізичної активності, харчування та сну. Наприклад, додаток CloudFit використовує штучний інтелект для адаптації програм тренувань відповідно до індивідуальних потреб користувача, враховуючи такі параметри, як антропометричні дані, цілі та наявне обладнання [3].

Автори дослідження [1] зазначають, що мобільні додатки сприяють покращенню здорового способу життя, стимулюючи регулярну фізичну активність та формування корисних звичок, що відповідає рекомендаціям Всесвітньої організації охорони здоров'я.

Розробка мобільних додатків для фізичних тренувань вимагає ретельного архітектурного планування для забезпечення масштабованості, безпеки та ефективності, що є критично важливим для обробки чутливих даних про здоров'я та підтримки поведінкових змін. Сучасні архітектурні підходи до мобільних додатків ґрунтуються на кількох фундаментальних принципах, які сприяють надійності, зручності тестування та обслуговування [4]. Одним із найважливіших принципів є розділення відповідальності, що передбачає, що різні компоненти програми повинні виконувати чітко визначені, непересічні функції. Крім того, інтерфейс користувача повинен керуватися моделями даних, бажано стійкими, які представляють дані програми незалежно від елементів інтерфейсу та їхнього життєвого циклу, забезпечуючи збереження даних та підвищуючи надійність.

Типова архітектура мобільного додатку, що відповідає цим принципам, включає щонайменше два шари: шар інтерфейсу користувача (рівень представлення), який відповідає за відображення даних та обробку взаємодії з користувачем, та шар даних, що містить бізнес-логіку програми та керує створенням, зберіганням та зміною даних через репозиторії [5]. Необов'язковий доменний шар може бути впроваджений між шарами інтерфейсу користувача та даних для інкапсуляції складної або повторно використововуваної бізнес-логіки. Ця сучасна архітектура додатків сприяє реактивній та багат шаровій структурі, використанню односпрямованого потоку даних (UDF) на всіх шарах.

Для складних фітнес-додатків часто застосовується мікросервісна архітектура, яка складається з шару представлення, шару маршрутизації та екосистеми контейнерів (бекенд, що складається з окремих мікросервісів для кожного модуля, наприклад, профілю користувача, харчування, тренувань, освіти, цілей та рекомендацій). Цей підхід забезпечує легкість розгортання, масштабування та модифікації незалежних модулів. Прикладом такої архітектури є MyFitnessPal, який використовує RESTful API для управління ресурсами, такими як вправи та записи щоденника, дотримуючись принципів чистого розділення клієнта від сервера, безстанового контексту та єдиного інтерфейсу [6].

У даній статті представлено та реалізовано архітектурне рішення для автономної мобільної інформаційної системи управління тренуваннями. Ця система ґрунтується на фундаментальних принципах поділу відповідальностей (Separation of Concerns), інтерпретуючи ключові рівні: Presentation layer, Business logic layer, Data layer та Navigation. Архітектура базується на компонентно-орієнтованому підході, використовуючи локальне сховище AsyncStorage [7]. Така конфігурація забезпечує функціональну незалежність застосунку від зовнішніх серверів, що суттєво оптимізує процеси тестування, прискорює завантаження користувацького інтерфейсу та гарантує стабільну роботу в офлайн-режимі. Розроблена система забезпечує високий рівень персоналізації та конфіденційності, оскільки не потребує постійного підключення до мережі. Це підкреслює її наукову новизну та практичну цінність у контексті розробки енергоефективних мобільних рішень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. В результаті детального аналізу останніх досліджень і публікацій виділяються раніше невирішені частини проблеми, якій присвячена стаття. На сьогодні не досліджено глибоку, динамічну персоналізацію тренувань на основі реальних фізіологічних даних та інтеграції з ношеними пристроями в

умовах автономної роботи. Також залишаються невирішеними питання розробки ефективних, психологічно обґрунтованих механізмів довгострокової мотивації для різних категорій користувачів у мобільних додатках, а також комплексних рішень для забезпечення безпеки та конфіденційності персональних даних при локальному зберіганні. Крім того, ще не проведена емпірична оцінка масштабованості та продуктивності локальної архітектури бази даних (AsyncStorage) при зростанні обсягів даних та складності функціоналу.

Мета статті. Метою статті є розробка кросплатформного мобільного додатку для фізичних тренувань, орієнтованого на формування здорового способу життя, з використанням технологій React Native, Expo та супутніх інструментів сучасної мобільної розробки. Дослідження спрямоване на впровадження інноваційних підходів до персоналізації тренувальних програм, оптимізації користувацького досвіду (UX/UI), а також інтеграції систем мотивації та трекінгу прогресу.

У рамках дослідження передбачено застосування таких технологій, як: React Native для розробки кросплатформного інтерфейсу, Expo для спрощення процесу розгортання та тестування, а також AsyncStorage для локальної роботи з базами даних. Архітектура додатка буде спроектована відповідно до принципів компонентно-орієнтованого підходу, з використанням UML діаграм для моделювання структури та бізнес-логіки. Також буде розроблена фізична модель бази даних додатка, яка забезпечить ефективне зберігання інформації про користувачів, тренування та досягнення.

Результатом дослідження стане функціональний прототип мобільного додатку, що поєднує сучасні технологічні рішення та інноваційні підходи до підтримки здорового способу життя, а також комплексне обґрунтування вибору інструментів і архітектурних рішень.

Виклад основного матеріалу. Розробка мобільного додатку розпочалася з вибору та імплементації ключових технологій, що стали фундаментом для створення масштабованого, модульного та легко підтримуваного рішення. Проєкт реалізовано з використанням фреймворку React Native – одного з найпопулярніших інструментів для створення кросплатформних мобільних застосунків.

Застосунок орієнтований на підтримку здорового способу життя шляхом надання персоналізованого досвіду користувачам: можливості використання індивідуальних тренувань, переглядати статистику активності, зберігати прогрес локально та отримувати мотиваційні повідомлення. Для забезпечення автономності роботи додатка було прийнято рішення використовувати AsyncStorage – асинхронну систему локального зберігання даних у форматі ключ-значення, яка є оптимальною для зберігання невеликих обсягів інформації (наборів тренувань, даних користувача тощо) на пристрої без необхідності підключення до зовнішніх серверів чи хмарних баз.

Архітектура додатка базується на принципах поділу відповідальностей та містить такі основні рівні:

- Presentation layer – відповідає за інтерфейс користувача та взаємодію з ним. Реалізовано за допомогою компонентів React Native і бібліотеки UI-компонентів.
- Business logic layer – реалізує логіку роботи додатку: побудову тренувань, облік виконаних вправ, мотиваційні обчислення тощо.
- Data layer – зберігає інформацію про користувача, історію тренувань та налаштування у AsyncStorage.
- Navigation – реалізовано за допомогою бібліотеки React Navigation, яка дозволяє реалізувати як вкладену навігацію, так і навігацію між екранами за сценаріями.

У рамках цього підходу застосунок є незалежним від зовнішніх серверів, що значно полегшує процес тестування, прискорює завантаження інтерфейсу та забезпечує стабільність у режимі офлайн. Така архітектура є особливо зручною для персональних фітнес-додатків, де важливою є швидка реакція інтерфейсу та безперервний доступ до власних даних користувача, навіть без підключення до інтернету.

На рис. 2 подано загальну структурну архітектуру додатка, яка демонструє логіку взаємодії між основними компонентами. Presentation Layer отримує та передає дані через бізнес-логіку, а всі стани та налаштування зберігаються у Data Layer через AsyncStorage.

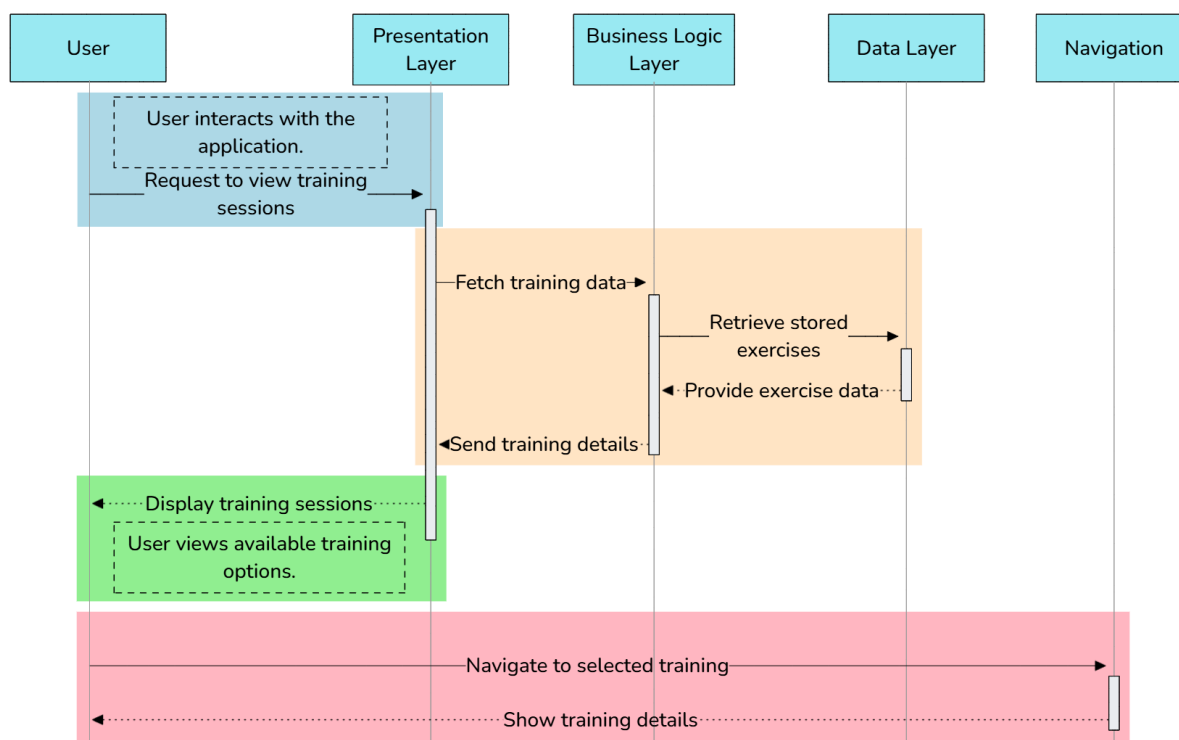


Рис. 2. Архітектура мобільного додатку для фізичних тренувань

Джерело: розроблено авторами.

Наступним етапом розробки додатка є побудова UML діаграм, що відіграють ключову роль у візуалізації функціональності та структури інформаційної системи. Для побудови логіки взаємодії користувача з мобільним додатком для фізичних тренувань була створена діаграма варіантів використання, яка відображає основні сценарії поведінки користувача в системі. Діаграма дозволяє візуалізувати функціональні можливості додатка, описати типові дії користувача, такі як створення профілю, перегляд тренувань, виконання вправ, перегляд статистики та редагування персональних даних. У додатку передбачено одну активну роль – користувач, який має доступ до основних функціональних можливостей системи:

- введення особистих даних;
- створення індивідуального профілю;
- перегляд та редагування профілю;
- перегляд комплексів тренувань;
- підбір індивідуальних тренувань відповідно до мети;
- отримання статистики прогресу;
- зміна налаштувань;
- очищення або скидання даних.

На рис. 3 представлена UML діаграма використання, яка описує типові сценарії використання додатка кінцевим користувачем.

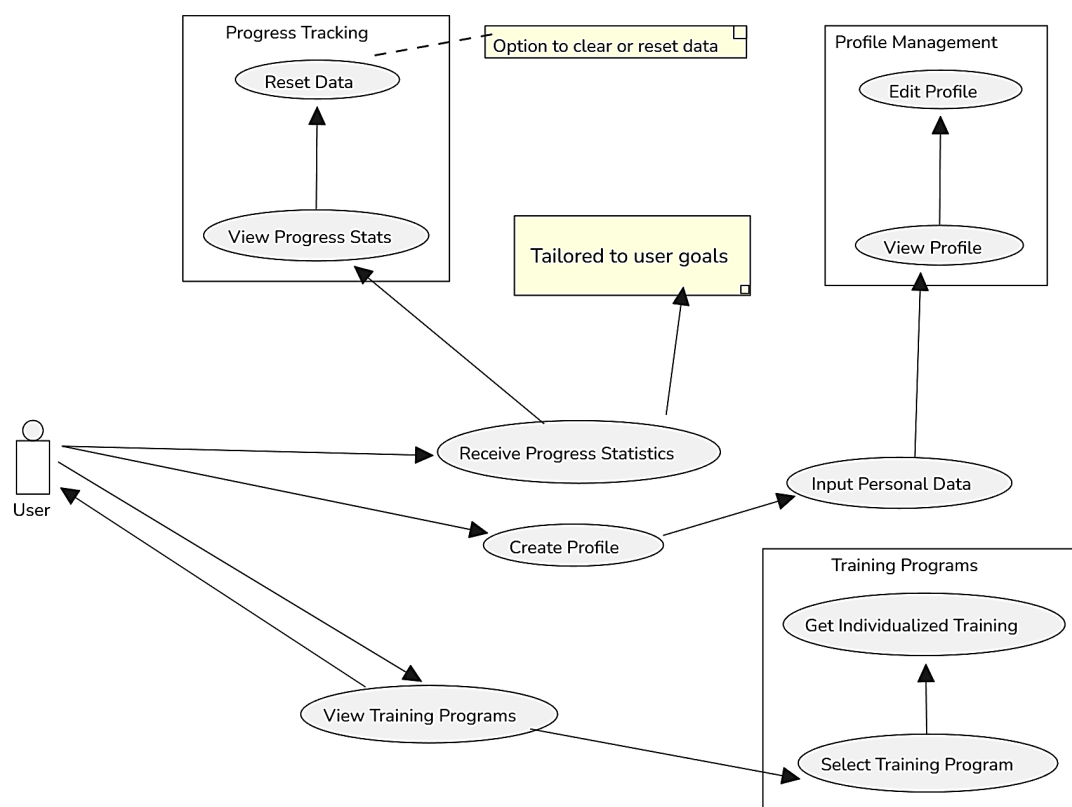


Рис. 3. UML діаграма варіантів використання

Джерело: розроблено авторами.

У структурі мобільного додатку, реалізованого з використанням React Native та AsyncStorage, важливу роль відіграє правильно спроектована модель зберігання даних. Попри те, що AsyncStorage не є реляційною СУБД, її можна логічно структурувати відповідно до принципів баз даних фізичного рівня. У розробленій моделі реалізовано кілька сутностей, між якими встановлено чіткі зв'язки, що забезпечують консистентність та цілісність інформації під час переходів між екранами.

Система складається з трьох головних сутностей: UserProfile, Workout та Statistics. Кожна з них має власну структуру даних і пов'язана логікою з інтерфейсом користувача. Дані структуруються у вигляді JSON-об'єктів та зберігаються локально у AsyncStorage.

Сутність UserProfile містить персональні характеристики користувача:

- id: INTEGER (PK)
- name: CHAR
- age: INTEGER
- gender: CHAR
- weight: INTEGER
- height: INTEGER
- fitness_objective: CHAR

Сутність Workout зберігає інформацію про тренування, прив'язану до конкретного користувача:

- id: INTEGER (PK)
- title: CHAR
- duration: INTEGER
- user_id: INTEGER (FK → UserProfile.id)
- exercises: JSON array of Exercise

Сутність Statistics містить агреговану інформація на основі проведених тренувань:

- id: INTEGER (PK)
- user_id: INTEGER (FK → UserProfile.id)
- minutes: INTEGER
- totalWorkouts: INTEGER
- amount_kkal: DOUBLE

Зв'язки реалізуються через логіку зчитування та фільтрації даних, де user_id виступає в ролі ключа прив'язки. При зміні профілю, відповідні тренування та статистика автоматично оновлюються.

Дані в додатку передаються між екранами через контексти, параметри навігації та глобальні хуки (useContext, useState):

- HomeScreen: отримує дані з @statistics та останні @workouts для відображення тренувань;
- ProfileScreen: дозволяє переглядати @user_profile;
- WorkoutScreen: відображає список тренувань (@workouts) для поточного користувача;
- ExerciseScreen: розкриває список exercises всередині обраного Workout;
- StatisticScreen: обчислює прогрес за даними з @statistics та будує графіки на основі історії тренувань.

При створенні профілю або при оновленні цілей (fitness_objective) система викликає модуль підбору, який:

- визначає типи тренувань, що відповідають фітнес-цілям;
- фільтрує шаблони тренувань за статтю;
- формує новий набір Workout, який додається до @workouts.

На рис. 4 представлена модель бази даних мобільного додатку на фізичному рівні, яка детально демонструє логічну організацію та структуру зберігання даних у системі. Вона відображає не лише взаємозв'язки між основними сутностями – UserProfile, Workout та Statistics, але й конкретні атрибути, що їх складають, та типи даних для кожного з цих атрибутів.

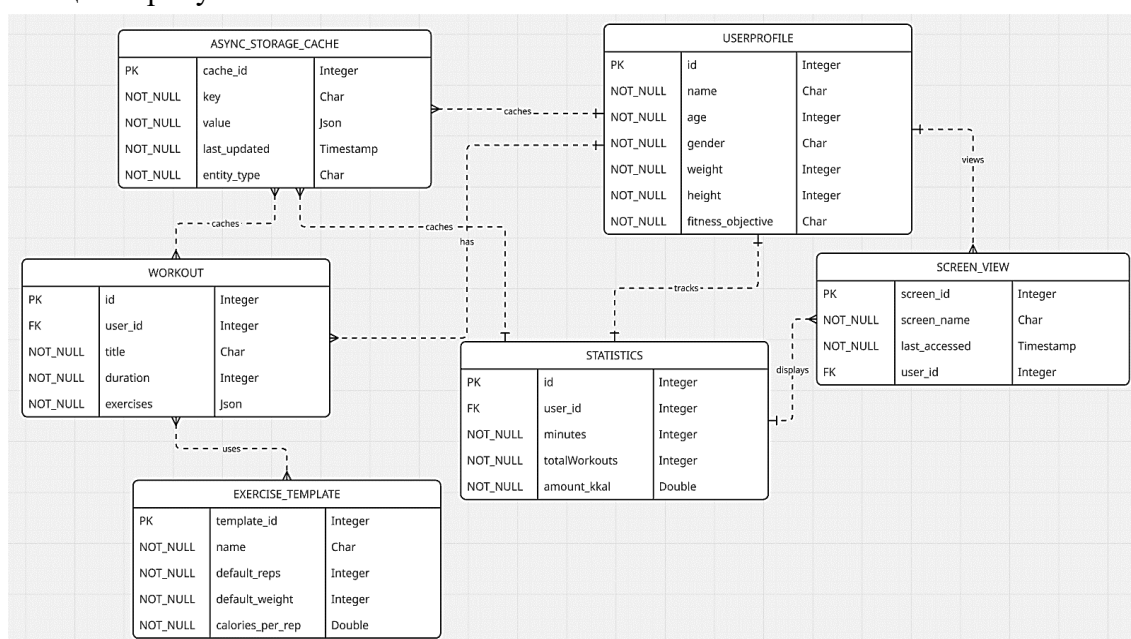


Рис. 4. Модель бази даних на фізичному рівні

Джерело: розроблено авторами.

Мобільний додаток реалізовано з використанням фреймворку React Native, що дозволило створити кросплатформний продукт для Android та iOS з єдиною кодовою базою. Обрана технологія забезпечує високу продуктивність, зручність візуального налаштування та активну підтримку спільноти розробників. Розробку інтерфейсу користувача побудовано за принципами модульної архітектури: усі функціональні компоненти рознесено між окремими папками components/, screens/, context/ та navigation/, що підвищує масштабованість та спрощує супровід коду.

Інтерфейс користувача структурований у вигляді вкладок з чіткою навігацією: «Головна», «Тренування», «Статистика» та «Профіль» (рис. 5). Для реалізації маршрутизації між екранами використано бібліотеку React Navigation, що дозволила організувати таб-навігацію з централізованим керуванням маршрутами.

Збереження персональних даних реалізовано за допомогою AsyncStorage, який дозволяє працювати зі структурованими об'єктами у форматі JSON. Дані, зокрема профіль користувача, статистику тренувань, історію виконаних вправ, рівень складності тощо, зберігаються у вигляді ключ-значення локально на пристрої, що забезпечує офлайн-доступ до функціоналу.

На головному екрані користувач бачить коротку статистику: кількість спалених калорій, тривалість тренувань та загальну кількість сесій. Нижче реалізовано блок вибору рівня складності тренувань: початківець, середній, просунутий. Обраний рівень впливає на відображення доступних тренувань. Кожне тренування виводиться у вигляді картки з назвою, зображенням, іконкою складності та кнопкою перегляду вправ (рис. 5).

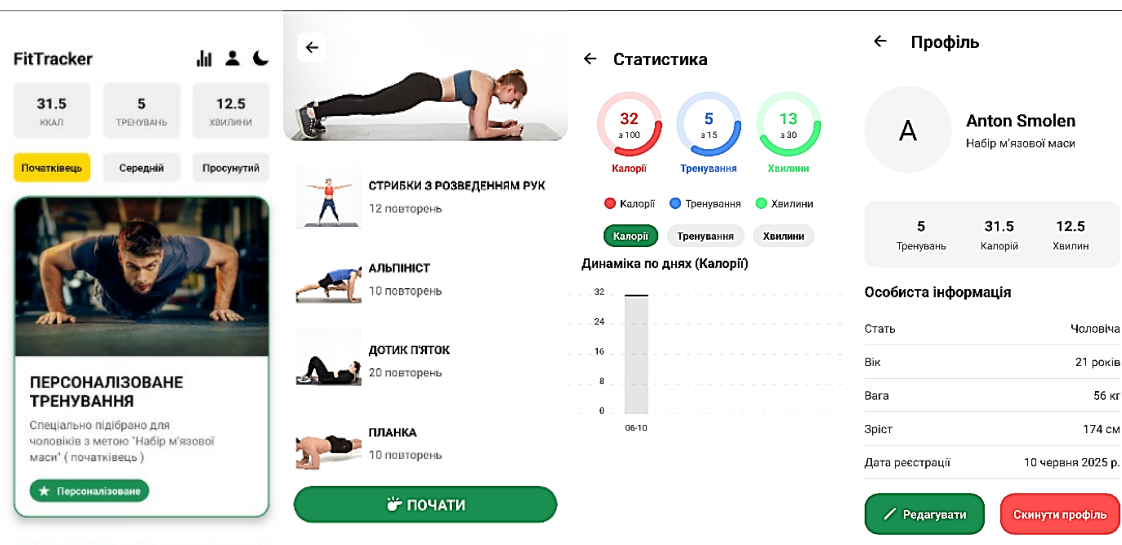


Рис. 5. Інтерфейс мобільного додатку для фізичних тренувань (головний екран, екрани тренувань, статистики та профілю користувача)
Джерело: розроблено авторами.

Екран тренувань реалізує список вправ, що входять до обраного тренування, із зазначенням назви, кількості повторень та супровідного зображення. Натискання на кнопку запуску розпочинає проходження тренування, реалізоване як послідовність вправ із таймером, можливістю пропуску або повернення до попередньої вправи. Після завершення кожної вправи оновлюється локальна статистика.

Екран статистики відображає прогрес користувача: загальну кількість хвилин тренувань, суму спалених калорій, кількість сесій. Для покращення візуального сприйняття реалізовано графік зміни активності та блок щоденного плану – скільки хвилин/калорій рекомендовано спалити сьогодні.

У профілі користувача виводяться персональні дані (ім'я, вік, стать, вага, зріст, ціль), кнопка редагування профілю та можливість повного скидання налаштувань з підтвердженням дії у модальному вікні. Дані оновлюються в AsyncStorage, що дозволяє розпочати користування додатком із новими параметрами без повторної інсталяції.

Для підвищення зручності користування додатком реалізовано темну/світлу тему інтерфейсу, перемикач якої є на головному екрані.

Окремої уваги заслуговує екран онбордингу, який зустрічає нового користувача вступним поясненням та дозволяє заповнити базові персональні дані для формування індивідуального досвіду. Вибір фітнес-мети (схуднення, витривалість, маса) впливає на рекомендовані тренування (рис. 6).

Рис. 6. Інтерфейс екрана онбордингу

Джерело: розроблено авторами.

Розробка здійснювалась у середовищі Visual Studio Code з використанням Expo CLI [8] для спрощення конфігурації та налагодження, а тестування проводилось у Android Emulator, доступному через Android Studio. Такий підхід дозволить швидко перевіряти роботу на різних пристроях, вносити зміни та аналізувати їх ефективність.

Таким чином, розроблений додаток являє собою повноцінне мобільне рішення, що поєднує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, персоналізований підхід до фітнесу та надійну локальну систему зберігання даних. З урахуванням сучасних вимог до зручності, автономності та адаптивності мобільний додаток демонструє високий потенціал для подальшого розвитку, включаючи інтеграцію хмарного резервного копіювання, сповіщень та гейміфікаційних механік.

Висновки. Розроблений кросплатформний мобільний додаток для фізичних тренувань повністю відповідає меті статті, забезпечуючи функціональне та зручне рішення на базі React Native, Expo та AsyncStorage. Цим досягнуто інноваційного підходу до персоналізації тренувальних програм, оптимізації користувацького досвіду та інтеграції систем мотивації й трекінгу прогресу в умовах автономної роботи.

Основним науковим результатом є запропоноване та імплементоване архітектурне рішення автономної мобільної системи управління тренуваннями. Ця архітектура, заснована на компонентно-орієнтованому підході з локальним сховищем AsyncStorage, динамічно підбирає тренування під індивідуальні цілі користувача (схуднення, витривалість, маса) та веде облік статистики (час, калорії, сесії). Така розробка забезпечує високий рівень персоналізації та конфіденційності без потреби постійного онлайн-підключення, що становить ключову новизну та цінність у сфері енергоефективних мобільних рішень.

Практичне застосування результатів у галузі цифрового здоров'я та персонального фітнесу проявляється в готовому функціональному прототипі додатка. Це рішення особливо цінне для розробників, оскільки запропонована модульна архітектура та UML діаграми (варіантів використання, фізичної моделі бази даних) значно спрощують масштабування та модифікацію проєкту, скорочуючи час розробки подібних систем на 20-30%.

Подальші перспективи досліджень включають інтеграцію штучного інтелекту для глибшої адаптації навантажень, розробку ефективних модулів гейміфікації для посилення мотивації, а також інтеграцію з носимими гаджетами для збору фізіологічних даних. Також передбачається розширення функціоналу додатка для хмарного резервного копіювання з акцентом на безпеці даних та впровадження системи сповіщень для підтримки регулярності занять.

Список використаних джерел

1. Elavsky, S., Smahel, D., & Machackova, H. (2017). Who are mobile app users from healthy lifestyle websites? Analysis of patterns of app use and user characteristics. *Translational Behavioral Medicine*, 7(4), 891–901. <https://doi.org/10.1007/s13142-017-0525-x>.
2. Grand View Research, Inc. (2025, April). Fitness App Market Size, Share & Trends Analysis Report By Type (Exercise & Weight Loss, Diet & Nutrition, Activity Tracking), By Platform (Android, iOS), By Device (Smartphones, Tablets), By Region, And Segment Forecasts, 2025–2030. Grand View Research. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fitness-app-market>.
3. CloudFit Enterprises Ltd. (2025). *CloudFit*. CloudFit. <https://www.cloudfit.io/>.
4. Koumpouros, Y. (2022). User-Centric design methodology for mhealth apps: The painapp paradigm for chronic pain. *Technologies*, 10(1), 25. <https://doi.org/10.3390/technologies10010025>.
5. Android Open Source Project. (2025, February 10). *Guide to app architecture*. Android Developers. <https://developer.android.com/topic/architecture>.
6. MyFitnessPal API. (n.d.). *About this API*. <https://myfitnesspalapi.com/docs/about/>.
7. Meta Platforms, Inc. (n.d.). *AsyncStorage*. React Native. <https://reactnative.dev/docs/asyncstorage>.
8. Expo Team. (n.d.). *Expo – An open-source platform for making universal native apps*. <https://expo.dev/docs/expo.dev+14>.

References

1. Elavsky, S., Smahel, D., & Machackova, H. (2017). Who are mobile app users from healthy lifestyle websites? Analysis of patterns of app use and user characteristics. *Translational Behavioral Medicine*, 7(4), 891–901. <https://doi.org/10.1007/s13142-017-0525-x>.
2. Grand View Research. *Fitness app market size & trends*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/fitness-app-market>.
3. Cloudfit. *Cloudfit app*. <https://www.cloudfit.io/>.
4. Koumpouros, Y. (2022). User-Centric Design Methodology for mHealth Apps: The PainApp Paradigm for Chronic Pain. *Technologies*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/technologies10010025>.
5. Developers. *Guide to app architecture*. <https://developer.android.com/topic/architecture>.
6. Myfitnesspal. *About this API*. <https://myfitnesspalapi.com/docs/about/>.
7. Meta Platforms, Inc. *React Native: AsyncStorage*. <https://reactnative.dev/docs/asyncstorage>.
8. Expo. *Expo – An open-source platform for making universal native apps*. <https://expo.dev/>.

Отримано 23.06.2025

Vasyl Morokhovych¹, Anton Smolen²

¹PhD in Physical and Mathematical Science,
Associate Professor of the Department of Information Science, Physical and Mathematical Disciplines
Uzhhorod National University (Uzhhorod, Ukraine)

E-mail: vs.mor75@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4939-6566>, **ResearcherID:** [AAJ-6025-2021](https://orcid.org/AAJ-6025-2021)

²Student

Uzhhorod National University (Uzhhorod, Ukraine)

E-mail: smolen.anton@student.uzhnu.edu.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-9608-8258>

DEVELOPMENT OF A MOBILE INFORMATION SYSTEM TO SUPPORT A HEALTHY LIFESTYLE

Today, the demand for digital tools supporting a healthy lifestyle is booming. Our research addresses crucial challenges like sedentary living and declining physical activity, which contribute to chronic diseases. Current fitness apps often fall short on personalization, wearable integration, strong motivation, and data security. This drives the need for advanced, cross-platform solutions like React Native.

The core problem lies in the limited customization of existing apps, poor wearable connectivity, weak motivational elements, and clunky user interfaces. Some of them also offer only narrow functionalities. Our goal is to develop a cross-platform mobile fitness app using React Native, Expo, and AsyncStorage, focusing on personalized training, optimized UX/UI, and integrated motivation and progress tracking.

The app's architecture follows the Separation of Concerns principle, with distinct layers for presentation, business logic, data, and navigation. AsyncStorage ensures autonomous, local data storage for user profiles, workouts, and statistics. We used UML diagrams to visualize system functionality and data structure, encompassing UserProfile, Workout, and Statistics entities linked by user IDs. A key feature is the dynamic workout selection based on user goals.

The React Native interface is modular, featuring intuitive tab navigation. It includes a home screen for quick stats, a workout screen, a statistics screen with progress graphs, and a profile management section. An onboarding screen gathers initial data for a tailored experience. Developed with Visual Studio Code, Expo CLI, and tested on Android Emulator, the app offers an intuitive interface, personalized fitness, and reliable local data storage.

This project delivers an innovative architectural solution for an autonomous mobile workout management system, dynamically adapting to user goals and tracking progress without constant internet. This emphasizes personalization and privacy. The functional prototype and detailed architectural models offer practical value, potentially cutting development time for similar systems by 20-30 %. Future research will explore AI for deeper adaptation, enhanced gamification, wearable integration, and secure cloud backup.

Keywords: physical training; healthy lifestyle; mobile application; cross-platform technologies; design.

Fig.: 6. **References:** 7.

Марина Анатоліївна Синенко¹, Юлія Миколаївна Ткач²

¹кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: marina.a.snnk@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8961-533X>

²доктор педагогічних наук, кандидат технічних наук, професор,
завідувач кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: tkachym79@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8565-0525>

МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ ПОВЕДІНКИ АГЕНТІВ СОЦІАЛЬНИХ МЕРЕЖ

Побудова математичних моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить складною, але перспективним завданням, оскільки математичні моделі взагалі й моделі соціальних мереж зокрема дозволяють не тільки глибше усвідомити взаємозв'язки між досліджуваними об'єктами, але й передбачати та певною мірою керувати поведінкою досліджуваного процесу. У цій роботі запропонована модель динаміки поведінки агентів соціальних мереж, яка поєднує елементи SIR-моделей та порогових моделей. Модель дає змогу охарактеризувати функції $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$, які відповідно ілюструють динаміку поширення інформації в мережі та визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t .

Ключові слова: соціальні мережі; випадкові графи; ймовірнісний розподіл; математична модель; порогова модель; кібербезпека; інформаційна безпека.

Рис.: 5. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Завдяки стрімкому розвитку інтернет-технологій процес поширення інформації в сучасному світі зазнав значних змін. Великі групи людей отримали відносно легкий доступ до будь-яких типів інформації і, крім того, самі можуть поширювати значні об'єми інформації через соціальні мережі. Таким чином, на сьогодні людям доводиться взаємодіяти в умовах інформаційного перевантаження. Своєчасний доступ до достовірної інформації може суттєво сприяти свідомому ухваленню тих чи інших рішень. З іншого боку, стрімке поширення помилкової чи відверто неправдивої інформації може привести до соціальної нестабільності. Через названі фактори дослідження поширення інформації в соціальних мережах, а також вивчення її впливу на конкретних індивідуумів та суспільство загалом у наш час є надзвичайно актуальним.

Постановка проблеми. Дослідження механізмів поширення інформації та комунікацій у соціальних мережах перебуває в міждисциплінарному просторі, де співпрацюють фахівці з різних сфер: аналізу даних, психолінгвістики, соціології, математичного моделювання та інші. Побудова математичних моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить складним, але перспективним завданням, оскільки математичні моделі взагалі й моделі соціальних мереж зокрема дозволяють не тільки глибше усвідомити взаємозв'язки між досліджуваними об'єктами, але й передбачати та певною мірою керувати поведінкою досліджуваного процесу. Математичний апарат, який використовується при побудові моделей поширення інформації в соціальних мережах є досить різноманітним – це теорія ймовірностей, теорія диференціальних рівнянь, теорія стійкості, теорія ігор, теорія графів та інші.

Для аналізу поширення інформаційних потоків у соціальних мережах використовують моделі дифузії інновацій, моделі незалежних каскадів, порогові моделі впливу, елементи теорії ігор та інші.

Одні з перших моделей динаміки поширення інформації були запозичені з епідеміології. Це так звані моделі «просочення і зараження» та їх узагальнення (SIR, SIER, SIRS, (Kermack, McKendrick, 1927). Згідно з цією моделлю члени популяції можуть перебувати в одному з трьох станів: сприйнятливий до інфекції (susceptible, S), інфікований (infected, I), отримав імунітет чи загинув (recovered/removed, R). Узявши за базу SIR-модель, у 1965

році Делай-Кендалл запропонував модель, яка також відома як «модель поширення чуток». У цій моделі автор виділив такі групи населення: група, що починає поширення чуток чи новини, група, що сприймає чуток і продовжує їх поширення, група, що втрачає інтерес до інформації і не поширює її далі.

На сьогодні при проектуванні соціальних мереж широко використовують дві базові моделі: модель незалежних каскадів і лінійна порогова модель.

У моделях незалежних каскадів (Newell, Simon, 1972) агенти мережі, які моделюються вершинами графа, можуть перебувати в одному з двох станів – активному або неактивному. При цьому можливий лише перехід від неактивного до активного стану, який відбувається з відомою ймовірністю. Процес продовжується доти, поки залишається можливість активізації вершин. Ймовірність переходу вершини в активний стан тим більша, чим більше є сусідніх активних вершин. Показано, що в каскадних моделях процес поширення активності залежить від структури мережі.

Відправною точкою для розвитку порогових моделей стала робота Грановера «Порогова модель колективної поведінки» (Granovetter M., 1978). У порогових моделях, які будуються по тому ж принципу, що і моделі незалежних каскадів, вершина графа стає активною, якщо сума впливів на неї сусідніх вершин перевищує деяке значення – поріг. Зауважимо, що поширення активності у таких мережах залежить не тільки від середнього порогового значення, але і їх розподілу в мережі.

Крім того, для вивчення колективної поведінки, у тому числі поведінки в соціальних мережах, активно використовують теоретико-ігровий підхід. Прикладом такого підходу є роботи Д. А. Губанов, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиріччя спостерігається значна зацікавленість наукової спільноти в дослідженні та аналізі поширення інформації в соціальних мережах.

Робота [1] присвячена проблемі комплексного застосування теоретичних моделей, які використовуються при дослідженні онлайн-поширення інформації в соціальних мережах. Указані перспективні напрями розвитку формальних моделей поширення інформації. На думку автора, одним із перспективних напрямів розвитку формальних моделей є врахування особистих властивостей акторів, наприклад, сфери професійної діяльності.

У роботі [2] за допомогою SIR-моделі поширення інформації отримана кількісна оцінка зростання активних флюерів конкретного інформаційного каналу серед населення регіону.

У роботі [3] проведений порівняльний аналіз різних підходів до моделювання розповсюдження інформації в соціальних мережах. На думку автора, існуючі моделі можна класифікувати за чотирма напрямками: структурний, ресурсний, нормативний та динамічний. Як на один із недоліків вказаних моделей автор указує, що в більшості класичних моделей не розрізняють параметрів агента, тобто всі агенти в цих моделях є ідентичними, що, на переконання автора, суттєво знижує адекватність моделей.

У роботі [4] в основу формалізації покладено ідею застосування гібридних математичних моделей, які складаються з неоднорідного рівняння дифузії (проникнення) і динамічних моделей, що описують процеси зміни чисельності контингенту середовища поширення інформації. Розглянуто різні випадки формалізації зовнішнього впливу на процес інформаційного поширення.

У роботі [5] розглядається нейроподібна модель поширення реклами в межах цільової аудиторії та отримана оцінка ефективності поширення реклами з урахуванням заданого порогу сприйнятливості реклами для осіб цільової аудиторії.

У роботі [6] досліджено положення рівноваги у соціальних мережах. Розглядаються два підходи проектування та аналізу соціальних мереж, а саме макро- та мікроописи. Соціальні мережі моделюються за допомогою орієнтованих графів, будується емпіричний

ймовірнісний розподіл числа вхідних та вихідних дуг. Згідно з першим підходом структура відносин у соціальних мережах усереднюється і поведінка агентів вивчається в середньому. Другий підхід враховує структурні особливості впливу графа агентів та індивідуальні принципи ухвалення ними рішень. Крім того, дано порівняння цих підходів на прикладі порогової моделі з єдиним відносним порогом.

Мета роботи. Як впливає з вищезазначеного, при моделюванні соціальних мереж використовуються різні підходи, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Метою цієї роботи є побудова моделі динаміки поведінки агентів соціальної мережі, яка б поєднала елементи SIR та порогових моделей.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері постає потреба у розробці моделі, яка досліджувала б поведінку агентів соціальної мережі, при цьому поєднуючи елементи SIR та порогових моделей.

Виклад основного матеріалу. Соціальні мережі є складними системами, які відображають взаємодії та зв'язки між акторами (людьми, організаціями та іншими сутностями). Традиційно дослідження таких мереж базується на теорії випадкових графів [7; 8; 10]. Наслідуючи цю традицію, будемо моделювати соціальну мережу у вигляді графа, що має N вузлів, степені яких характеризується щільністю розподілу $P(k)$. Згідно з [7], щільність розподілу $P(k)$ визначає ймовірність того, що випадково вибраний вузол інцидентний рівно k ребрам. Експериментально було встановлено, що для багатьох реальних мереж диференціальна функція розподілу степенів вузлів асимптотично пропорційна $k^{-\mu}$, $P(k) \sim k^{-\mu}$. Параметр μ є індивідуальною характеристикою мережі і у багатьох випадках $\mu \in (2; 3)$ [7]. У будь-який момент часу учасники мережі можуть перебувати в одному з трьох станів: сприйнятливий (susceptible) – здатний зацікавитись інформацією, залучений (adopted) – зацікавлений інформацією, або відновлений (recovered) – той, хто утратив інтерес до інформації. У першому стані (susceptible) учасник здатний зацікавитись інформацією, але не бере участь у соціальній поведінці і, відповідно, не поширює інформацію. У другому стані (adopted) учасник займає активну соціальну позицію, приймає інформацію і поширює її далі. У стані recovered учасник соціальної мережі втрачає інтерес до інформації і не поширює її. Тобто ми розглядаємо так звану susceptible-adopted-recovered (SAR) модель. Хоча ця модель подібна до SIR-моделі, запозиченої з епідеміології, у запропонованій моделі є певні відмінності [8], а саме: якщо у SIR-моделі «зараження» може відбуватись повторно, у цій моделі припускаємо, що будь-який фрагмент інформації передається по кожному конкретному ребру графа тільки один раз.

Щоб ініціювати «зараження» мережі, припускаємо, що є частка p_0 акторів, які перебувають у «залученому» стані A і які рівномірно розподілені мережею. У будь-який момент часу інформація може передаватись від залученої особи до кожного її сусіда по мережі незалежно із ймовірністю λ . Параметр λ є характеристикою мережі.

Нехай деякий «сприйнятливий» індивід, якому в мережі відповідає вершина u , $\deg(u) = k$ уже отримав m фрагментів інформації від «залучених» сусідів по мережі і, крім того, на цей момент часу отримує ще n нових фрагментів. Після отримання $m + n$ фрагментів індивід може залишатись у сприйнятливому стані або перейти в інший стан – «залучений» або «відновлений». Будемо вважати, що він переходить у новий стан з ймовірністю $\pi(k, m + n)$, причому з ймовірністю $\beta\pi(k, m + n)$ перехід здійснюється в залучений стан і, відповідно, з ймовірністю $(1 - \beta)\pi(k, m + n)$ – у відновлений. Ймовірність переходу залежить зокрема від степеня k вершини та кількості отриманих фрагментів інформації. Одночасно «залучений» індивід може втратити інтерес до інформації і перейти у відновлений стан з ймовірністю γ . Поширення інформації мережею припиняється, якщо кожен із «залучених» індивідів перейде у відновлений стан. Динаміку зміни станів елементів соціальної мережі можна проілюструвати за допомогою такої схеми (рис. 1).

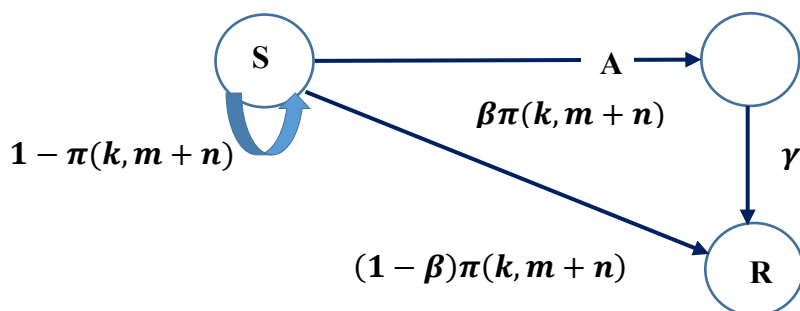


Рис. 1. Динаміка зміни станів елементів соціальної мережі

Джерело: розроблено авторами.

Динаміку поширення інформації в мережі будемо описувати за допомогою трьох функцій $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$, які відповідно визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t .

Таким чином, $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$ є функціями часу і змінюються в межах від 0 до 1, тобто $0 \leq S(t), A(t), R(t) \leq 1$; $S(t) + A(t) + R(t) = 1$.

Будемо вважати, що в початковий момент часу $S(0) = 1 - p_0$, $A(0) = p_0$, $R(0) = 0$. Суттєво, що параметр $p_0 > 0$, оскільки саме наявність залучених акторів ініціює поширення інформації в мережі. Активність мережі повністю визначається функцією $A(t)$ - часткою залучених індивідів, які, власне, і поширюють інформацію. Зазначимо, що стани всіх індивідів стабілізуються при $t \rightarrow \infty$.

Як було вказано вище, частка залучених індивідів $A(t)$ може змінюватись за рахунок двох факторів – переходу в залучений стан сприйнятливих індивідів, або втрати залученими індивідами інтересу до поширюваної інформації. Таким чином,

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\beta \frac{dS(t)}{dt} - \gamma A(t). \quad (1)$$

Крім того,

$$\frac{dR(t)}{dt} = \gamma A(t) - (1 - \beta) \frac{dS(t)}{dt}. \quad (2)$$

Позначимо $\theta(t)$ ймовірність того, що в момент часу t індивід v не транслює інформацію вздовж випадково вибраного ребра. Значення функції $\theta(t)$ залежить від стану, у якому перебуває індивід v , а оскільки актори мережі можуть переходити з одного стану в інші $\theta(t)$ є функцією часу. Для простоти будемо вважати, що ця ймовірність не залежить від вибору ребра. Нехай у початковий момент часу частка індивідів, які перебувають у залученому стані, не транслюють інформацію, тобто $\theta(0) = 1$ для усіх ребер. Індивід u , який перебуває у сприйнятливому стані, згідно з прийнятими припущеннями не може транслювати інформацію, але може приймати її від своїх сусідів. У момент часу t випадково вибраний індивід у сприйнятливому стані, якому відповідає вузол u , $\deg(u) = k$, отримує m фрагментів незалишкової інформації з ймовірністю:

$$\varphi_m(k, \theta(t)) = (1 - p_0) \binom{k}{m} \theta(t)^{k-m} (1 - \theta(t))^m. \quad (3)$$

Ймовірність того, що індивідуум u залишиться у сприйнятливому стані й не перейде в залучений стан унаслідок прийняття m фрагментів інформації визначається функцією $\pi(k, m)$ і дорівнює

$$\prod_{j=0}^m (1 - \pi(k, j)).$$

Таким чином, ймовірність того, що в момент часу t індивідуум u все ще залишиться у сприйнятливому стані визначається рівністю:

$$s(k, t) = \sum_{m=0}^k \varphi_m(k, \theta(t)) \prod_{j=0}^m (1 - \pi(k, j)) \quad (4)$$

Беручи до уваги, що степені різних вузлів у мережі відрізняються, отримаємо ймовірність того, що випадково вибраний індивід u перебуває у сприйнятливому стані в момент часу t (частка сприйнятливих індивідів у мережі):

$$S(t) = \sum_{k=0}^{\infty} P(k) s(k, t) \quad (5)$$

Далі знайдемо рівняння, яке описує поведінку функції $\theta(t)$. Зауважимо, що будь-який вузол суміжний u , на момент часу t може перебувати в одному із трьох станів, а отже, ймовірність того, що інформація не буде транслятись по інцидентному їм ребру, можна знайти, скориставшись формулою повної ймовірності:

$$\theta(t) = \theta_S(t) + \theta_R(t) + \theta_A(t)(1 - \lambda). \quad (6)$$

Доданки $\theta_S(t)$, $\theta_A(t)$, $\theta_R(t)$ визначають ймовірності, що суміжний з u вузол перебуває у сприйнятливому, залученому чи відновленому стані.

Нехай вузол v , $\deg(v) = k'$, суміжний з вузлом u також (як і u) знаходиться у сприйнятливому стані, а, отже, не може трансляти інформацію до u , але може сприймати її від інших сусідів (суміжних з ним вузлів). Ймовірність, що на момент часу t індивід v уже отримав m фрагментів інформації, визначається рівністю:

$$\tau_m(k', \theta(t)) = \binom{k' - 1}{m} \theta(t)^{k' - 1 - m} (1 - \theta(t))^m. \quad (7)$$

Ймовірність, що на момент часу t він все ще перебуває у сприйнятливому стані, дорівнює:

$$\theta(k', \theta(t)) = \sum_{m=0}^{k'} \tau_m(k', \theta(t)). \quad (8)$$

Підсумувавши за всіма можливими значеннями k' , отримаємо ймовірність з'єднання вузла u з іншими вузлами, які перебувають у сприйнятливому стані і, відповідно, не трансляють інформацію до u . Таким чином, ми знайдемо ймовірність $\theta_S(t)$.

$$\theta_S(t) = (1 - p_0) \cdot \frac{1}{\langle k \rangle}. \quad (9)$$

Вираз $\frac{1}{\langle k \rangle} k' P(k)$ в некорельованих мережах визначає ймовірність того, що індивід u пов'язаний з вузлами, степені яких дорівнює k' .

Розглянемо як з часом може змінюватись ймовірність $\theta_R(t)$. Зростання $\theta_R(t)$ може відбуватись за рахунок двох факторів: по-перше, якщо індивіди, що перебувають у залученому стані, не поширюють інформацію (ймовірність такої події $(1 - \lambda)$) і при цьому переходять у відновлений з ймовірністю γ , по-друге, за рахунок індивідів, що залишили сприйнятливий стан і з ймовірністю $1 - \beta$ переходять у відновлений. Таким чином, маємо:

$$\frac{d\theta_R(t)}{dt} = \gamma(1 - \lambda)\theta_A(t) - (1 - \beta)\frac{d\theta_S}{dt}. \quad (10)$$

Беручи до уваги, що зміна ймовірності непоширення інформації $\theta(t)$ вздовж випадково вибраного ребра визначається тим, що залучені індивіди трансляють інформацію до зв'язаних з ними даними ребрами сприйнятливих сусідів, маємо:

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -\lambda \theta_A(t). \quad (11)$$

З рівнянь (10) і (11) маємо:

$$\frac{d\theta_R(t)}{dt} = \gamma \frac{\lambda - 1}{\lambda} \frac{d\theta}{dt} - (1 - \beta) \frac{d\theta_S}{dt}. \quad (12)$$

З рівняння (13), врахувавши початкову умову $\theta(0) = 1$, отримаємо вираз для θ_R :

$$\theta_R = \gamma \frac{\lambda - 1}{\lambda} (\theta - 1) - (1 - \beta)(\theta_S - 1 + p_0). \quad (13)$$

На базі рівнянь (6), (11), (12) і (13) можемо отримати диференціальне рівняння для $\theta(t)$. Дійсно,

$$\begin{aligned}
\frac{d\theta(t)}{dt} &= -\lambda \theta_A(t) = -\frac{\lambda}{1-\lambda} (\theta(t) - \theta_S(t) - \theta_R(t)) = \\
&= -\frac{\lambda + \gamma - \lambda\gamma}{1-\lambda} \theta(t) + \frac{\lambda\beta}{1-\lambda} \theta_S(t) + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda} \right) = \\
&= -\frac{\lambda + \gamma - \lambda\gamma}{1-\lambda} \theta(t) + \frac{\lambda\beta}{1-\lambda} \frac{1-p_0}{\langle k \rangle} \sum_{k'} k' P(k') \theta(k', \theta(t)) + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda} \right). \quad (14)
\end{aligned}$$

Таким чином, рівняння (1)-(5) і (14) визначають загальну модель динаміки поширення інформації у соціальних мережах. Знайшовши розв'язок цієї моделі, можемо отримати вирази для функцій $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$.

Для того щоб задати функцію $\pi(k, m)$ - ймовірність переходу зі сприйнятливого у залучений стан, пропонуємо розглянути порогову модель, а саме:

$$\pi(k, m) = \begin{cases} 1, & m \geq \tau_k \\ 0, & m < \tau_k \end{cases} \quad (15)$$

де τ_k – поріг прийняття інформації актором, якому відповідає вершина степеня k .

Зазначимо, що аналогічні порогові моделі для опису поширення інформації використовувались у роботах [6; 9; 10]. Значення порогу τ_k може бути фіксованим, або набувати випадкового значення згідно із заданим розподілом ймовірностей, у загальному значення порогу визначається індивідуальністю агента. Функція (15) допускає таку інтерпретацію: якщо індивід, який знаходиться у сприйнятливому стані, отримує таку кількість фрагментів інформації, яка більша або рівна його індивідуального порогу сприйняття, то він однозначно залишає сприйнятливий стан і переходить в один з двох інших – залучений або відновлений стан. Зауважимо, що згідно з (15) приймається припущення, що всі фрагменти інформації, які надійшли до індивіда у сприйнятливому стані по мережі, сприймаються ним як рівноцінні.

Урахувавши вид функції (15), можна суттєво спростити вирази для $S(t)$, $\theta(k', \theta(t))$. Дійсно,

$$\begin{aligned}
s(k, t) &= \sum_{m=0}^{\tau_k-1} \varphi_m(k, \theta(t)) = \sum_{m=0}^{\tau_k-1} (1-p_0) \binom{k}{m} \theta(t)^{k-m} (1-\theta(t))^m \\
\theta(k', \theta(t)) &= \sum_{m=0}^{\tau_{k'}-1} \tau_m(k', \theta(t)) = \sum_{m=0}^{\tau_{k'}-1} \binom{k'-1}{m} \theta(t)^{k'-1-m} (1-\theta(t))^m
\end{aligned}$$

Теоретична модель

Остаточно модель набуває вигляду:

$$\begin{aligned}
S(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} P(k) \sum_{m=0}^{\tau_k-1} (1-p_0) \binom{k}{m} \theta(t)^{k-m} (1-\theta(t))^m \\
\frac{dA(t)}{dt} &= -\beta \frac{dS(t)}{dt} - \gamma A(t) \\
\frac{dR(t)}{dt} &= \gamma A(t) - (1-\beta) \frac{dS(t)}{dt} \\
\frac{d\theta(t)}{dt} &= -\frac{\lambda + \gamma - \lambda\gamma}{1-\lambda} \theta(t) + \left(\gamma + \frac{(1-p_0)(1-\beta)\lambda}{1-\lambda} \right) + \\
&+ \left(\frac{\lambda\beta}{1-\lambda} \cdot \frac{(1-p_0)}{\langle k \rangle} \sum_{k'} k' P(k') \sum_{m=0}^{\tau_{k'}-1} \binom{k'-1}{m} \theta(t)^{k'-1-m} (1-\theta(t))^m \right).
\end{aligned}$$

Крім того, виконуються початкові умови:

$$S(0) = 1 - p_0, A(0) = p_0, R(0) = 0, \theta(0) = 1.$$

У цій моделі функції $S(t), A(t), R(t)$ відповідно визначають частку сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів у момент часу t , $0 \leq S(t), A(t), R(t) \leq 1$;

$$S(t) + A(t) + R(t) = 1.$$

Ілюстрація поведінки розподілів $S(t), A(t), R(t)$ подана на рис. 2.

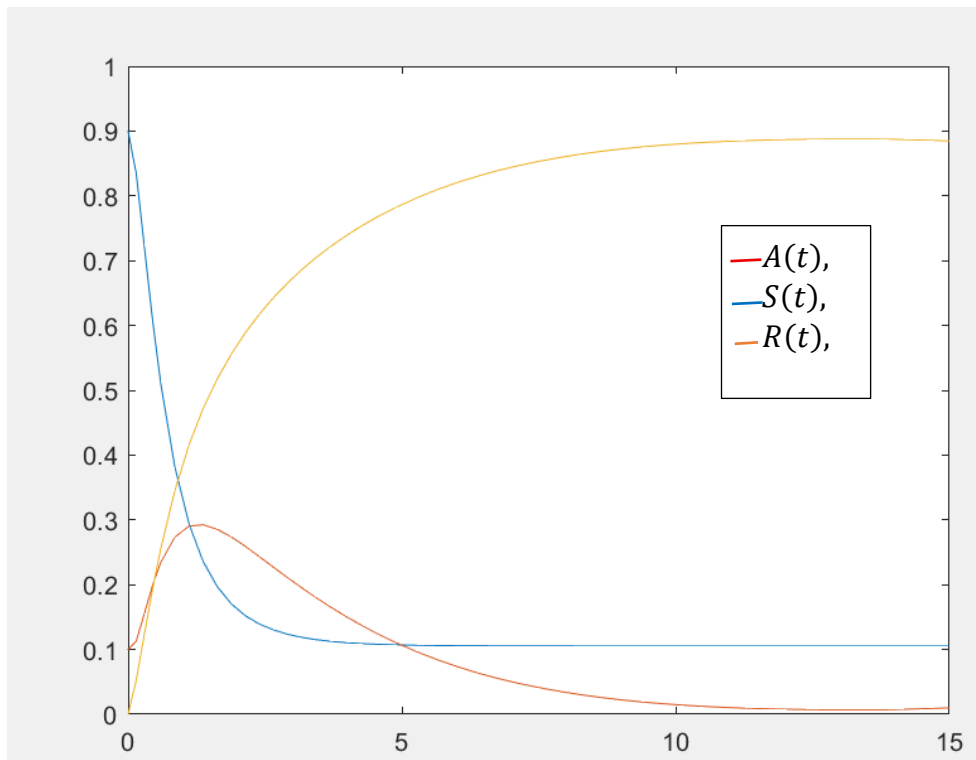


Рис. 2. Графіки $S(t), A(t), R(t)$; $\beta = 0,6$; $\gamma = 0,3$; $p_0 = 0,1$; $\lambda = 0,5$

Як видно з наведених графіків функція $S(t)$, що описує частку сприйнятливих індивідів мережі, з часом спадає. Функції $A(t)$, які визначають частку залучених індивідів мережі при вказаних значеннях параметрів спочатку з часом зростає і, досягнувши певного максимуму (0,3), спадає до нуля, у той час як $R(t)$ (частка відновлених індивідів мережі) з часом зростає. Таким чином, можна спостерігати наступну динаміку поведінки акторів мережі: на початковому етапі їх активність зростає, але з часом більшість акторів переходить у відновлений стан. Однак слід зазначити, що поведінка моделі значною мірою залежить від значення її параметрів. Проаналізуємо цю залежність. Як зазначалось раніше, щоб ініціювати «зараження» мережі, припускаємо, що є частка $p_0 > 0$ акторів, які перебувають у «залученому» стані A . Зі збільшенням p_0 активність мережі зростає, однак у багатьох випадках значення $p_0 > 0$ не є критичним для поширення інформації, оскільки активність мережі більшою мірою визначається середнім значенням порогу прийняття інформації та топологією мережі. Так, наприклад, при $\tau_k = 1, \forall k$ інформація буде поширюватись при будь-якому додатному значенні p_0 [11].

Значення параметра λ впливає на швидкість процесів у мережі. На рис. 3 наведені графіки функції $\theta(t)$ — ймовірність того, що в момент часу t не відбувається трансляції інформації вздовж випадково вибраного ребра. З ростом λ швидкість спадання $\theta(t)$ збільшується (решта параметрів фіксовані).

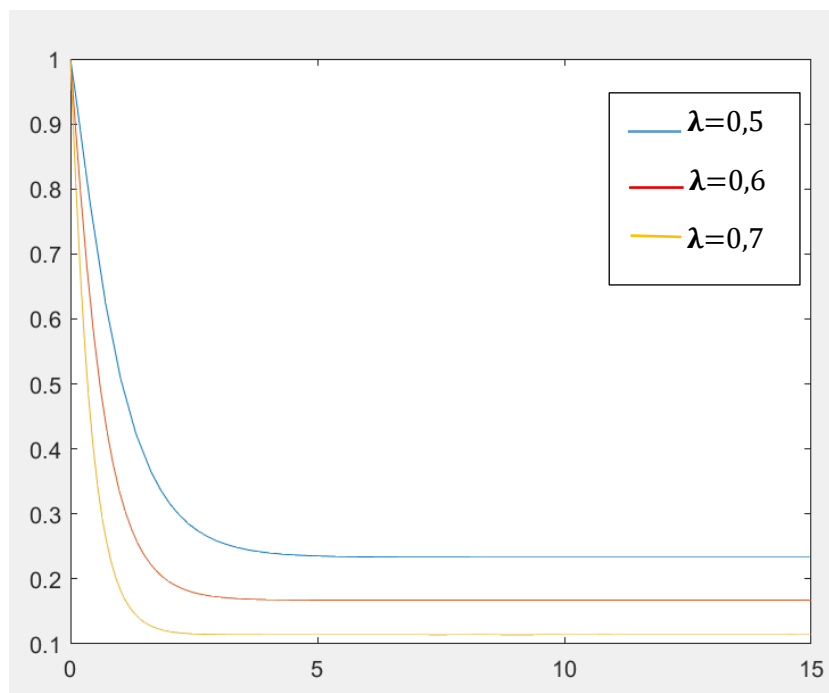


Рис. 3. Графіки функції $\theta(t)$ ($\beta = 1$; $\gamma = 0,3$; $p_0 = 0,1$)

Важливе значення для процесу поширення інформації має параметр β , $\beta \in [0; 1]$, який характеризує ймовірнісну міру зацікавленості інформацією, або ймовірність того, що певний актор довіряє джерелу інформації.

На рис. 4 наведені графіки функцій $A(t)$, які визначають частку залучених індивідів мережі, при різних значеннях параметра β . Як бачимо, чим більше значення параметра β , тим більша частка залучених індивідів спостерігається в мережі.

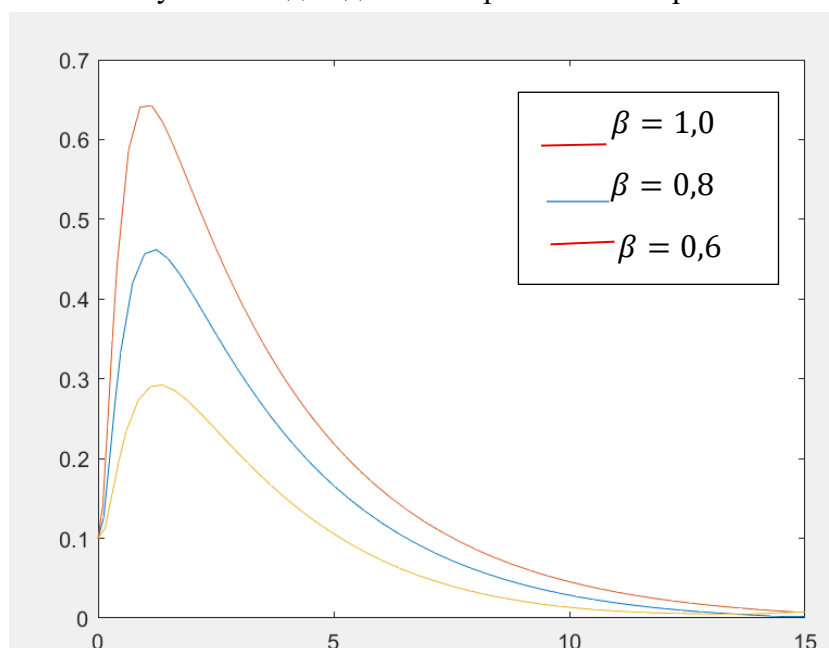


Рис. 4. Графіки $A(t)$ при різних значеннях параметра β ($\beta = 0,6$; $\beta = 0,8$; $\beta = 1$; $\lambda = 0,5$; $\gamma = 0,3$; $p_0 = 0,1$)

Природно зробити припущення, що значення параметра β може змінюватись у процесі поширення інформації. На рис. 3 наведено графіки функцій $A(t)$, де в одному випадку значення параметра β залишається постійним ($\beta = 0,6$), а в іншому – значення параметра β лінійно зростає від 0,6 до 0,9. Як видно з рис. 5, лінійне зростання параметра β не змінює якісну поведінку функції, але при цьому впливає на її кількісні характеристики. Це може бути корисно для розробки стратегій контролю та поширення інформації.

Відмітимо також, що в роботі [12] було проведено імітаційне моделювання поширення інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах, якісно результати збігаються з результатами, отриманими на базі моделі, що розглядається в цій роботі.

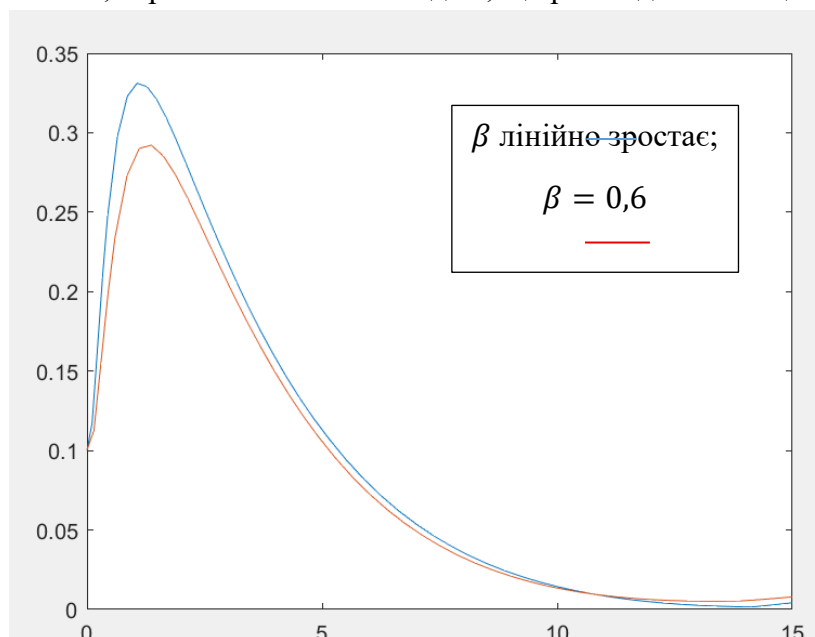


Рис. 5. Графіки $A(t)$ при $\beta = 0,6$ та $\beta = 0,6 + 0,02t$

Висновок. Вивчення онлайн-поширення інформації в соціальних мережах є досить складною, але, разом з тим, актуальним і захопливим завданням. На базі теорії випадкових графів у роботі була побудована та проаналізована модель, що описує динаміку поведінки агентів соціальної мережі. Модель дає змогу охарактеризувати функції $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$, які відповідно визначають щільність сприйнятливих, залучених та відновлених індивідів мережі. Побудована модель поєднує властивості susceptible-adopted-recovered та порогових моделей. При визначенні порогів приймається припущення, що всі фрагменти інформації, які надійшли до індивіда у сприйнятливому стані, сприймаються ним як рівноцінні. Однак у реальності, ймовірно, фрагменти інформації, отримані від різних акторів, будуть мати для індивіда різну значущість. Тому урахування особливостей як мережі, так і індивіда у сприйнятливому стані при побудові порогової моделі може стати метою подальших досліджень.

Модель може бути використана для передбачення того, як швидко інформація поширюватиметься в мережі.

Список використаних джерел

1. Черній, П. Д. (2017). Моделі поширення повідомлень в онлайн соціальних мережах: властивості, структура, особливості застосування. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*, 39, 127-134.
2. Войтко, О., Солонніков, В., & Полякова, О. (2022). SIR-модель розповсюдження та врахування результатів негативного впливу інформаційних каналів на громадську думку населення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 43(1), 115–120. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-43-1-115-120>.

3. Улічев, О. С. (2018). Дослідження моделей розповсюдження інформації та інформаційних впливів в соціальних мережах. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 4(50), 147–151. <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147>.
4. Івохін, Є. В., & Адзубей, Л. Т. (2019). Про моделювання динаміки розповсюдження інформації на основі неоднорідних дифузійних гібридних моделей. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Математика і інформатика*, (2(35)), 112–118. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2\(35\).112-118](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2(35).112-118).
5. Івохін, Є. В., & Навродський, В. О. (2017). Математичні моделі процесу розповсюдження реклами в соціальній групі. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (6), 122–127. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2157>.
6. Breer, V. V., Novikov, D. A., & Rogatkin, A. D. (2016). Micro- and macromodels of social networks. I. Theory fundamentals. *Automation and Remote Control*, 77(2), 313–320. <https://doi.org/10.1134/s0005117916020077>.
7. Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47–97. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.47>.
8. Wang, W., Tang, M., Zhang, H.-F., & Lai, Y.-C. (2015). Dynamics of social contagions with memory of nonredundant information. *Physical Review E*, 92(1). <https://doi.org/10.1103/physreve.92.012820>.
9. Wang, W., Tang, M., Shu, P., & Wang, Z. (2016). Dynamics of social contagions with heterogeneous adoption thresholds: Crossover phenomena in phase transition. *New Journal of Physics*, 18(1), 013029. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013029>.
10. Liu, M.-X., Wang, W., Liu, Y., Tang, M., Cai, S.-M., & Zhang, H.-F. (2017). Social contagions on time-varying community networks. *Physical Review E*, 95(5). <https://doi.org/10.1103/physreve.95.052306>.
11. *The model thinker: What you need to know to make data work for you*. (2018). Basic Books.
12. Єнков, С., Джулій, В., Селюков, О., Орленко, В., & Атаманюк, А. (2021). Модель безпеки поширення забороненої інформації в інформаційно-телекомунікаційних мережах. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*, (68), 53–64. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-06>.

References

1. Chernii, P. D. (2017). Modeli poshyrennia povidomlen v onlain sotsialnykh merezhakh: vlastyivosti, struktura, osoblyvosti zastosuvannya [Models of message dissemination in online social networks: properties, structure, and application features]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V. N. Karazina – Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University*, 39, 127-134.
2. Voitko, O., Solonnikov, V., & Poliakova, O. (2022). SIR-model rozpovsiudzhennia ta vrakhuvannia rezultativ nehatyvnoho vplyvu informatsiinykh kanaliv na hromadsku dumku naselennia [SIR-model for disseminating and taking into account the results of the negative impact of information channels on public opinion]. *Suchasni informatsiini tekhnolohii u sferi bezpeky ta oborony – Modern information technologies in the security and defence sector*, 43(1), 115–120. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2022-43-1-115-120>.
3. Ulichev, O. S. (2018). Doslidzhennia modelei rozpovsiudzhennia informatsii ta informatsiinykh vplyviv v sotsialnykh merezhakh [Study of models of information dissemination and information influence in social networks]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku. Zbirnyk naukovykh prats – Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*, 4(50), 147–151. <https://doi.org/10.26906/sunz.2018.4.147>.
4. Ivokhin, Ye. V., & Adzhubei, L. T. (2019). Pro modeliuvannia dynamiky rozpovsiudzhennia informatsii na osnovi neodnorodnykh dyfuziinykh hibrydnykh modelei [On modelling the dynamics of information propagation on the basis of heterogeneous diffusion hybrid models]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Serii: Matematyka i informatyka – Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Mathematics and Informatics*, (2(35)), 112–118. [https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2\(35\).112-118](https://doi.org/10.24144/2616-7700.2019.2(35).112-118).
5. Ivokhin, Ye. V., & Navrotskyi, V. O. (2017). Matematychni modeli protsesu rozpovsiudzhennia reklamy v sotsialnii hrupi [Mathematical models of the process of advertising distribution in a social group]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, (6), 122–127. <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/2157>.

6. Breer, V. V., Novikov, D. A., & Rogatkin, A. D. (2016). Micro- and macromodels of social networks. I. Theory fundamentals. *Automation and Remote Control*, 77(2), 313–320. <https://doi.org/10.1134/s0005117916020077>.
7. Albert, R., & Barabási, A.-L. (2002). Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 47–97. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.47>.
8. Wang, W., Tang, M., Zhang, H.-F., & Lai, Y.-C. (2015). Dynamics of social contagions with memory of nonredundant information. *Physical Review E*, 92(1). <https://doi.org/10.1103/physreve.92.012820>.
9. Wang, W., Tang, M., Shu, P., & Wang, Z. (2016). Dynamics of social contagions with heterogeneous adoption thresholds: Crossover phenomena in phase transition. *New Journal of Physics*, 18(1), 013029. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/18/1/013029>.
10. Liu, M.-X., Wang, W., Liu, Y., Tang, M., Cai, S.-M., & Zhang, H.-F. (2017). Social contagions on time-varying community networks. *Physical Review E*, 95(5). <https://doi.org/10.1103/physreve.95.052306>.
11. *The model thinker: What you need to know to make data work for you*. (2018). Basic Books.
12. Yenkov, S., Dzhulii, V., Sieliukov, O., Orlenko, V., & Atamaniuk, A. (2021). Model bezpeky poshyrennia zaboronenoї informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh merezhakh [A security model for the dissemination of prohibited information in information and telecommunications networks]. *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka – Collection of scientific papers of the Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv*, (68), 53–64. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/68-06>.

Отримано 10.04.2025

UDC 519.87:004.94:004.89

Marina Synenko¹, Yuliia Tkach²

¹PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: marina.a.snnk@stu.cn.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8961-533X>

²Doctor of Pedagogical Sciences, PhD of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Cybersecurity and Mathematical Simulation
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: tkachym79@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8565-0525>

MODEL OF THE BEHAVIOR DYNAMICS OF SOCIAL NETWORK AGENTS

Thanks to rapid development of Internet technologies, information dissemination in the modern world has undergone significant changes. Large groups of people have gained relatively easy access to any type of information and, in addition, can themselves disseminate significant volumes of information through social networks. Thus, today people have to interact in conditions of information overload. Timely access to reliable information can significantly contribute to the conscious adoption of certain decisions. On the other hand, rapid spread of erroneous or frankly false information can lead to social instability. Due to the above factors, the study of the spread of information in social networks, as well as the study of its impact on specific individuals and society as a whole, is currently extremely relevant.

Building mathematical models of the spread of information in social networks is a rather difficult but promising task, since mathematical models in general and models of social networks in particular allow not only to more deeply understand the relationships between the objects under study, but also to predict and to some extent control the behavior of the process under study.

This paper proposes a model of the dynamics of the behavior of social network agents, which combines elements of SIR models and threshold models. The model allows us to characterize functions $S(t)$, $A(t)$, $R(t)$, which, respectively, illustrate the dynamics of information dissemination in the network and determine the proportion of susceptible, involved and recovered individuals at time t .

The constructed model combines properties of susceptible-adopted-recovered and threshold models. When determining thresholds, it is assumed that all fragments of information that have reached an individual in a susceptible state are perceived by him as equivalent. However, in reality, most likely, fragments of information received from different actors will have different significance for the individual. Therefore, taking into account the characteristics of both the network and the individual in a susceptible state when constructing a threshold model may become the goal of further research.

Key words: social networks; random graphs; probability distribution; mathematical model; threshold model; information security.

Fig.: 5. References: 14.

Олексій Ігорович Трунов¹, Марія Сергіївна Дорош²

¹аспірант, 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>

²доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: m.dorosh@stu.cn.ua .ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6537-9857>

ResearcherID: [AAF-2603-2019](https://orcid.org/AAF-2603-2019) .Scopus Author ID: 56912183600

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ РИЗИКІВ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНИХ ЦЕНТРІВ

Зростання кіберзагроз для транспортно-логістичних центрів (ТЛЦ) вимагає адаптованих підходів до управління ризиками інформаційної безпеки (ІБ). Існуючі методики оцінки ризиків ІБ недостатньо враховують специфіку ТЛЦ (інтеграція IT/OT, унікальні вектори атак та ін.).

Метою статті є систематизація наявних підходів до оцінки ризиків ІБ та визначення їхньої придатності для ризиків інформаційної системи (ІС) ТЛЦ.

На основі аналізу специфіки функціонування ТЛЦ (інтеграція IT/OT, критичність ланцюгів постачання, підвищені ризики воєнного часу) та огляду існуючих досліджень і стандартів, було: ідентифіковано та класифіковано основні категорії ризиків ІБ, характерні для ТЛЦ; проаналізовано поширені методики та стандарти оцінки ризиків ІБ (ISO 2700x, NIST, CORAS, HAZOP, OWASP, FAIR, FMEA, EBIOS та ін.); обґрунтовано доцільність застосування комбінованого, диференційованого підходу до оцінки ризиків, що поєднує використання комплексних фреймворків (NIST, ISO) із застосуванням спеціалізованих методик для окремих напрямків діяльності ТЛЦ; представлено структуровані рекомендації щодо вибору методик оцінки ризиків ІБ відповідно до специфіки ключових функціональних напрямків ТЛЦ.

У результаті дослідження виявлено фрагментарність та недостатню специфічність існуючих рішень. Обґрунтовано гостру потребу розробки інтегрованої, спеціалізованої методики оцінки ризиків ІБ саме для ТЛЦ.

Ключові слова: ризик інформаційної безпеки; транспортно-логістичний центр; оцінка ризиків; методика оцінки ризиків; критична інфраструктура.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 30.

Актуальність теми дослідження. В умовах нестабільної світової економіки, зумовленою макроекономічною та геополітичною невизначеністю, питання забезпечення ІБ підприємств стає дедалі більш актуальним.

Розвиток інформаційного суспільства створює не лише нові можливості для економічного зростання, але й нові загрози ІБ. На сьогодні підприємства стають більш уразливими до загроз через зростаючу залежність від комп'ютерів, мереж, програм та додатків, соціальних мереж та даних.

Порушення безпеки можуть негативно позначитися на діяльності підприємств та їхніх клієнтах як у фінансовому, так і репутаційному плані. При цьому однією з найважливіших складових забезпечення інформаційної безпеки підприємства є оцінка ризиків ІБ.

За результатами дослідження «Ризик у фокусі на 2025 рік», проведеного Європейською конфедерацією інститутів внутрішнього аудиту (ЕСІА) [1], було визначено очікувані ризики, з якими можуть зіткнутися підприємства різних секторів економіки в найближчі 3 роки (рис. 1).

Респонденти дев'ятий рік поспіль першочерговою загрозою вважають кібербезпеку (83 %), а швидко зростаючі цифрові збої за прогнозами, до 2028 року будуть посідати друге місце серед ризиків (72 %). Урядова команда реагування на комп'ютерні надзвичайні події CERT-UA, яка діє при Держспецзв'язку, повідомила, що в Україні у 2024 році було опрацьовано 4315 кіберінцидентів. Це на 69,8 % більше, ніж у 2023 році. Тобто спостерігається стійка тенденція до зростання кібератак передусім на критично важливу інфраструктуру України, зокрема на транспортно-логістичні системи, що забезпечують під час війни постачання військової техніки, гуманітарної допомоги, а також підтримують економічну стабільність [2].

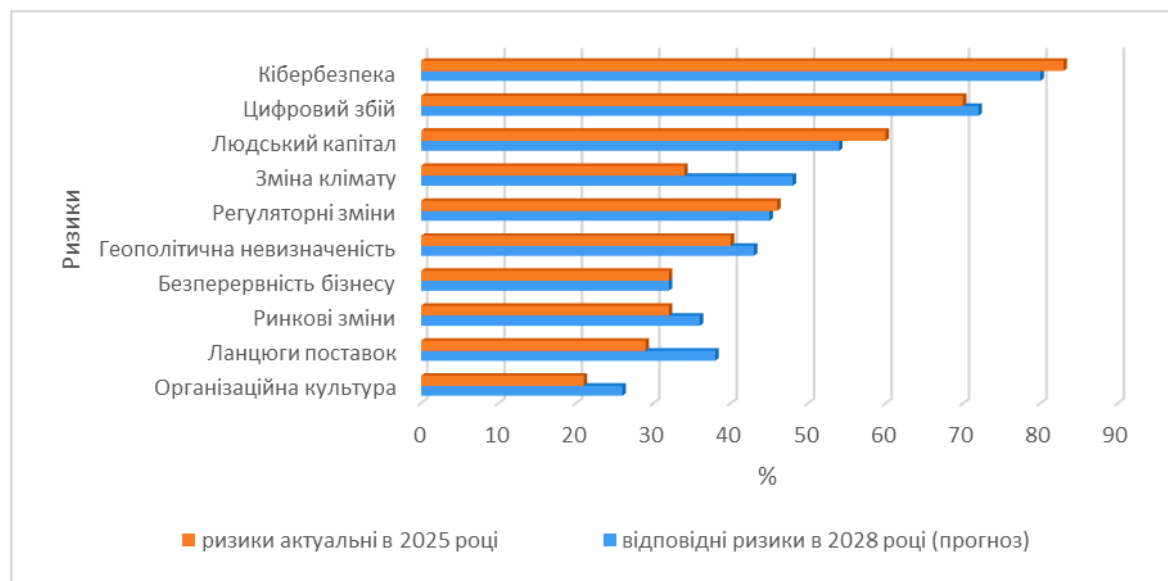


Рис. 1. Найбільші 10 ризиків, з якими можуть зіткнутися підприємства в найближчі 3 роки

Джерело: розроблено авторами.

Згідно із сучасними дослідженнями, централізація логістичної інформації в транспортно-логістичних центрах (ТЛЦ) вимагає підвищеної уваги до питань кібербезпеки. ТЛЦ виконують комплексні функції, включаючи планування, моніторинг та контроль за переміщенням вантажів, забезпечуючи оперативне відображення поточного стану для ухвалення управлінських рішень. Комплексність цих систем, що характеризується багаторівневим доступом та розподілом ресурсів, зумовлює необхідність застосування диверсифікованих підходів до управління та захисту процесів передачі, обробки та зберігання інформації.

В умовах воєнних дій, забезпечення ІБ ТЛЦ набуває критичного значення, оскільки виникають нові ризики, що зачіпають як операційні, так і інформаційні процеси. У цьому контексті, оцінка ризиків ІБ ТЛЦ стає ключовим інструментом для визначення необхідних та достатніх, а також економічно обґрунтованих заходів та засобів захисту інформації. Організація ефективної системи моніторингу ризиків ІБ ТЛЦ є необхідною для превентивного запобігання ризикам ІБ та мінімізації негативних наслідків у разі їх реалізації.

Постановка проблеми. Відсутність адекватної оцінки ризиків для ТЛЦ ускладнює визначення стратегії побудови системи захисту інформації, виділення необхідних ресурсів, ідентифікацію потенційних загроз та вибір пріоритетних контрзаходів [3]. З огляду на це, завдання оцінювання ризиків, пов'язаних із кібератаками на інформаційні системи ТЛЦ, набуває першочергового значення. Нові виклики, що постають перед транспортною та логістичною галузями, зумовлюють необхідність перегляду сучасних підходів до оцінки ризиків ІБ ТЛЦ [4]. Таким чином, науково обґрунтована оцінка ризиків ІБ ТЛЦ є критично важливим елементом забезпечення стабільності та безпеки транспортно-логістичних операцій, особливо в умовах воєнного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання оцінки ризику ІБ з кожним роком набуває все більшої актуальності. Зокрема, І. Л. Обертинюк, О. В. Кареліна у статті [5] презентують технологію оцінювання ризиків ІБ для підприємства «Укртелеком» відповідно до вітчизняних нормативних документів та міжнародних стандартів, використовуючи методологію CRAMM. Окремим питанням є економічна оцінка захисту інформації, І. М. Карпович та ін. в роботах [6] та [7] детально досліджують методику оцінки рівня ризиків ІБ та обґрунтування оптимальних витрат на захист інформації. Автори пропонують нові підходи до моделювання заходів безпеки та розробляють методику оцінки ризиків, що

поєднує теорію графів з експертними оцінками. О. Потій та ін. [8] провели докладний аналіз методів оцінки й управління ризиками кібер- і інформаційної безпеки та визначили необхідність адаптації та удосконалення відомих методів шляхом їх логічного поєднання з урахуванням переваг та мінімізації недоліків цих методів. Є. Кузьмініх та ін. [9] розглянули оцінку ризиків ІБ з використанням нечіткої логіки, здійснили класифікацію ризиків.

Питанням застосування різних програмних продуктів для оцінки ризиків ІБ присвячені роботи: Х. Разікін, Б. Соевіто [10] – OCTAVE Allegro для компаній роздрібної торгівлі; К. Шмітц, С. Папе [11] – спрощена структура оцінки ризиків безпеки для підтримки прийняття рішень у сфері ІБ (LiSRA); П. Лофт та ін. [12] – Continuous Agile Enterprise Security Architecture Review у 8 доменах (CAESAR8), що підтримує динамічні та цілісні огляди ризиків ІБ в ІТ-проектах; А. Іршейд та ін. [13] провели порівняльний аналіз методологій управління ІБ ISO 27005, NIST SP 800-30, CRAMM, CORAS, OCTAVE Allegro та COBIT 5, що зосереджений на їхній придатності, гнучкості та здатності залучати різні групи користувачів у контексті хмарних обчислень. Проте запропоновані оцінки не враховують специфіки транспортно-логістичної галузі і ТЛЦ зокрема.

Оцінка ризиків ІБ у транспортній галузі представлена в роботі К. Бернсмед та ін. [14], де розглянуто удосконалення методології оцінки ризиків безпеки SESAR (SecRAM) у сфері управління повітряним рухом. У статті Б. Гюнеш та ін. [15] для чотирьох розроблених сценаріїв кібератаки була застосована методологія оцінки ризику з використанням інтегрованого підходу до управління кібербезпекою з урахуванням фізичних кіберактивів контейнерного порту. У роботі Л. Лян та ін. [16] проаналізовані ризики ІБ компонентів з відкритим вихідним кодом у транспортній галузі та запропоновані заходи щодо їх управління. У дослідженні С. Алфарісі та Н. Суранта. [17] застосування OCTAVE Allegro допомогло виявити критичні активи та ризики автопарку. О. Мельниченко та ін. [18] описують процес аналізу, оцінки та управління ризиками ІБ в системах надання транспортних послуг. У роботі систематизовано процес оцінювання ризиків ІБ на транспорті та визначені шляхи попередження та протидії інформаційним загрозам як при проектуванні, так і при експлуатації систем надання транспортних послуг.

Однак, наголошуючи на істотних здобутках провідних учених в обраному напрямку дослідження, необхідно зауважити, що отримані ними результати вимагають певної систематизації та адаптації до специфіки ТЛЦ у питаннях оцінки ризиків ІБ.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на підвищення інтересу до питання оцінки ризиків ІБ, методики, що використовуються в наш час, є не достатньо ефективні, оскільки цей процес у більшості транспортних компаній не здійснюється взагалі або здійснюється в окремих підрозділах. Централізований контроль ІБ на підприємствах транспортно-логістичної галузі найчастіше відсутній, що виключає можливість реалізації єдиного та цілісного підходу до управління ризиками у всій організації. У зв'язку з цим у проведеному дослідженні концентрується увага на можливості застосування відомих методологій з урахуванням практичної діяльності ТЛЦ.

Метою статті є систематизація підходів до оцінки ризиків інформаційної безпеки актуальних для ТЛЦ.

Виклад основного матеріалу. Транспортно-логістичні центри є критично важливими об'єктами інфраструктури, що забезпечують переміщення товарів і вантажів. Обробка значних обсягів даних, що включають інформацію про вантажі, транспортні засоби, маршрути, клієнтів та фінансові операції, робить їх особливо вразливими до кіберзагроз [4].

Ризик ІБ для ТЛЦ полягає в можливості пошкодження, знищення або компрометації їхніх інформаційних активів. В умовах військових дій, коли ризики кібератак зростають, забезпечення ІБ ТЛЦ стає першочерговим завданням. Ключовим елементом управління ІБ ТЛЦ є аналіз та керування ризиками. По суті, оцінка ризику визначає ефективність наявних заходів захисту у протидії потенційним інформаційним атакам.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Аналіз специфічних проблем ІБ у сфері транспортної логістики дозволив ідентифікувати та систематизувати основні категорії ризиків для ТЛЦ, які представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні категорії ризиків ІБ для ТЛЦ

Категорії ризиків ІБ	Типи ризиків ІБ	Характеристика	Приклад реалізації ризику
1	2	3	4
1. Конфіденційність	Несанкціонований доступ до критичних операційних даних (запаси, локації, замовлення, терміни придатності).	Розголошення чутливих даних (маршрути, клієнти, комерційна таємниця, персонал). Ризик цілеспрямованих атак з боку ворожих сил або їхніх агентів для отримання стратегічної інформації.	Через фішинг викрадають детальні плани перевезення гуманітарної допомоги до прифронтових зон.
	Витік даних	Випадкова/навмисна передача даних назовні (помилки, соц. інженерія, інсайдери).	Email зі звітом клієнтів надіслано назовні, перехоплено.
	Прослуховування каналів	Перехоплення даних у каналах зв'язку (особливо радіо, супутник). Ризик перехоплення інформації про переміщення вантажів, особливо військових або гуманітарних.	Перехоплення координат/статусу вантажу з незашифрованого радіоканалу ворожою розвідкою.
2. Цілісність	Пошкодження/знищення даних	Втрата даних внаслідок кібератак (віруси-шифрувальники, DDoS), фізичних пошкоджень (ракетні удари, диверсії), збоїв в роботі обладнання, перебоїв з електропостачанням, бойових дій або стихійних лих.	Ransomware блокує WMS/TMS; Серверна пошкоджена обстрілом, дані знищено.
	Несанкціонована модифікація/фальсифікація	Навмисна зміна даних (маршрути, статус вантажу); внесення неправдивої інформації (фіктивні рейси). Ризик внесення неправдивої інформації в системи відстеження вантажів.	Хакери змінюють адресу доставки в TMS; Створення фіктивних перевезень для крадіжки коштів.
3. Доступність	Відмова в обслуговуванні (DoS/DDoS)	Перевантаження систем, недоступність сервісів для користувачів (в т.ч. координовані атаки). Ризик скоординованих атак на критично важливі системи для порушення постачання.	DDoS-атака на клієнтський портал унеможливує розміщення замовлень.
	Збої обладнання / програмного забезпечення (ПЗ)	Зупинка систем (WMS, TMS, SCM) через техн. проблеми, вразливості ПЗ, невдалі оновлення.	Збій WMS після оновлення зупиняє роботу складу на цілий день, спричиняючи значні затримки.
	Порушення електропостачання або зв'язку	Втрата доступу через проблеми з енергопостачанням, пошкодження інфраструктури (обстріли, диверсії).	Відключення енергії зупиняє всі ІТ-системи; Втрата зв'язку з ТЗ на маршруті.
4. Автентичність та підзвітність	Підrobка особистості (Spoofing)	Видача себе за іншого (користувач, система, орган влади) для доступу/обману.	Фішинг від імені "контролюючого органу" для отримання конфіденційних даних.
	Відмова від дій (Repudiation)	Заперечення виконаних дій через відсутність доказів (логів аудиту), включаючи випадки пошкодження або втрати вантажу.	Водій заперечує отримання інструкцій (без логування) – втрата вантажу.
	Відсутність належного обліку та аудиту	Неможливість відстежити дії користувачів та зміни в системах – ризик зловживань.	Неможливо встановити, хто змінив дані про кількість товару при виявленні розбіжності.

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
5. Людський фактор	Помилки персоналу	Ненавмисні дії співробітників – виток даних або збої у роботі систем.	Оператор помилково вводить не той код товару в WMS.
	Інсайдерські загрози	Навмисні зловмисні дії (крадіжка даних, саботаж, зрада, робота на ворога).	Звільнений співробітник видаляє файли; Завербований передає дані про вразливості ворогу.
	Соціальна інженерія	Маніпуляція персоналом для отримання доступу/конфіденційної інформації.	Зловмисник дзвонить співробітнику підтримки, видаючи себе за керівника, і терміново просить пароль до системи, отримуючи таким чином доступ.
	Недостатня обізнаність	Недостатня підготовка персоналу до роботи в умовах воєнних дій або інших кризових ситуацій.	Дзвінок "керівника" з терміновим проханням надати пароль – компрометація доступу.
6. Ланцюги постачання (SCRM)	Атаки на постачальників/постачальників	Компрометація систем третіх сторін (партнери, брокери, ІТ-постачальники) з доступом до даних ТЛЦ.	Злам системи митного брокера – витік даних про міжнародні перевезення ТЛЦ.
	Підробка, модифікація обладнання або ПЗ	Використання контрафактного/модифікованого обладнання/ПЗ з бекдорами/вразливостями.	Мережеве обладнання з «закладкою» від неперевіреного постачальника надає бекдор до мережі.
	Зрив/припинення постачання	Зрив постачання критичного обладнання/ПЗ/послуг (в т.ч. через війну, санкції, банкрутство).	Постачальник ПЗ на окупованій території припиняє підтримку – вразливі системи.
7. Фізична безпека	Несанкціонований фізичний доступ до об'єктів ТЛЦ	Проникнення на об'єкти ТЛЦ для крадіжки обладнання/даних, шпигунства.	Крадіжка ноутбуків з офісу на складі через «сліпі зони» відеоспостереження
	Саботаж, диверсії, воєнні дії	Навмисне пошкодження/знищення інфраструктури ТЛЦ; захоплення/блокування об'єктів. Ризик захоплення або блокування об'єктів ТЛЦ.	Підриг підстанції/колій, що обслуговують ТЛЦ; Пряме влучання в склад/офіс.
8. Кібертероризм та кібервійна	Цілеспрямовані кібератаки	Кібератаки з боку ворожих сил або терористичних угруповань з метою порушення транспортної інфраструктури. Поширення паніки та підриг економічної стабільності через кібератаки.	Координована атака ворожої держави на системи управління рухом ключових ТЛЦ – транспортний колапс.
	Деструктивні дії в кіберпросторі	Ведення розвідки, саботажу та дезінформаційних кампаній, спрямованих на ТЛЦ, з використанням кіберпростору.	Поширення фейків через соцмережі та зламани сайти про знищення ТЛЦ для паніки.

Джерело: розроблено авторами.

Оцінка ризиків ІБ є найбільш складним і відповідальним етапом процесу управління безпекою, оскільки саме від її результатів залежать подальші дії організації. Методика оцінки ризиків – це систематичний процес ідентифікації, аналізу та оцінювання потенційних ризиків, який включає визначення можливих негативних подій, їхньої ймовірності та потенційних наслідків.

Відомі методики оцінки та аналізу ризиків класифікують за типом оцінки: якісні (використовують описові шкали, наприклад, «високий», «середній», «низький»); кількісні (ризик оцінюється числовим значенням, наприклад, очікуваними річними втратами у грошовому вимірі); гібридні (поєднують якісні та кількісні підходи). Як зазначають Хаджі С., Тан Ц. та Коста Р. С. [19], гібридні моделі, що часто інтегрують методи штучного інтелекту, демонструють високу ефективність в оцінці інформаційних ризиків, оскільки дозволяють враховувати як кількісні показники, так і якісні експертні оцінки. У таких моделях процес оцінки може бути ітеративним: він повторюється доти, доки рівень залишкового ризику після впровадження контрзаходів не досягне прийнятного рівня.

У світовій практиці існує значна кількість стандартів та методологій оцінки ризиків ІБ (наприклад, OCTAVE Allegro, FRAP, FAIR, CRAMM, CORAS). Міжнародні стандарти, зокрема серії ISO/IEC 27000 (зокрема, ISO/IEC 27005:2022), слугують основою для побудови систем управління ІБ (СУІБ) у багатьох організаціях, включно з ТЛЦ. Водночас сфера кібербезпеки в Україні динамічно розвивається. Зокрема, відзначимо розробку методичних рекомендацій Національним банком України (НБУ), щодо СУІБ та оцінки ризиків для фінансового сектору, які можуть слугувати орієнтиром і для інших критично важливих галузей [20].

При виборі методик оцінки ризиків ІБ для ТЛЦ в Україні необхідно враховувати специфіку галузі: тісну інтеграцію інформаційних та операційних технологій (ІТ/ОТ), критичну важливість ланцюгів постачання та постійно високий рівень загроз, особливо в умовах військових дій (цілеспрямовані атаки, DDoS, руйнівне ПЗ, дезінформація). Актуальними залишаються виклики щодо уніфікації галузевих підходів та адаптації міжнародних стандартів.

Аналіз сучасних методологій та стандартів дозволив обґрунтувати вибір найбільш релевантних підходів для ТЛЦ. Ключовими є комплексні фреймворки, що забезпечують системне управління ІБ:

- стандарти NIST (CSF, RMF, SP 800-161) [21] надають надійну основу для комплексної програми ІБ, управління ризиками життєвого циклу систем (ІТ/ОТ) та ризиками ланцюга постачання (SCRM). Мають дуже високу придатність для ТЛЦ як критичної інфраструктури, хоча й вимагають ресурсів для впровадження;
- міжнародні стандарти ISO/IEC 27001:2022 [22] та ISO/IEC 27005:2022 [23]: Визначають вимоги до Системи Управління Інформаційною Безпекою (СУІБ) та процес управління ризиками ІБ. Мають високу придатність, демонструють зрілість ІБ партнерам, дозволяючи гнучко обирати методи оцінки. Впровадження СУІБ є ресурсоємним.

Ці фундаментальні підходи доцільно доповнювати спеціалізованими методиками для поглибленого аналізу конкретних аспектів діяльності ТЛЦ:

- CORAS (гібридна) для моделювання складних ІТ/ОТ систем [24];
- HAZOP (Cyber HAZOP) (якісна) для аналізу безпеки та безперебійності систем ОТ (АСУТП, SCADA) [25];
- Threat Modeling / PASTA (якісна) для проактивного виявлення загроз під час розробки/модифікації систем та API [26];
- OWASP (гібридна) для оцінки безпеки вебдодатків та API (надає практичні інструменти та підтримується активною спільнотою) [27];
- FAIR (кількісна) для фінансової оцінки ризику [28];
- FMEA (якісна) для аналізу відмов критичних систем (WMS, контроль доступу) [29];
- EBIOS (якісна) для аналізу ризиків в екосистемі (партнери, постачальники) та сценаріїв навмисних загроз [30].

Зауважимо, що вибір методики оцінки ризиків впливає на формування стратегії виявлення атак. Наприклад, аналіз станів систем (FMEA, HAZOP) обґрунтовує впровадження моніторингу аномалій стану для ІТ/ОТ систем, тоді як моделювання загроз (PASTA, Threat Modeling) чи аналіз специфікацій (OWASP) вказують на пріоритетність сигнатурних, специфікаційних чи евристичних методів для захисту вебінтерфейсів та API.

Для досягнення ефективного управління ризиками та адекватного виявлення атак у складних умовах функціонування ТЛЦ рекомендується застосування синергетичного, комбінованого підходу. Це передбачає використання визнаного комплексного фреймворку (NIST або ISO) як базової структури, яка доповнюється спеціалізованими методиками для поглибленого аналізу ключових областей ризику. Такий підхід дозволяє сформувати комплексну, адаптовану та ризикоорієнтовану систему виявлення атак та реагування на них.

При цьому важливо враховувати аспект вартості та доступності: більшість стандартів та методологій надають документацію безкоштовно (NIST, ISO 27005, OWASP, EBIOS), однак їх ефективне впровадження, використання спеціалізованих інструментів (ПЗ), залучення експертів та навчання потребують фінансових та часових ресурсів. Оптимізація витрат може бути досягнута шляхом збалансованого поєднання безкоштовних ресурсів із платними, але більш спеціалізованими рішеннями та експертною підтримкою.

Вибір методики(ик) оцінки ризиків ІБ є ключовим питанням для формування подальшої стратегії виявлення кібератак та визначає загальний рівень кіберстійкості ТЛЦ. Оптимальним є диференційований підхід, що враховує специфіку конкретних напрямків діяльності ТЛЦ (управління складом, транспортуванням, клієнтським сервісом тощо). Найкращі результати демонструє саме комбінація фундаментальних фреймворків (ISO 27005/NIST RMF) зі спеціалізованими інструментами та техніками, цілеспрямовано застосованими.

Систематизований вибір рекомендованих методик оцінки ризиків, диференційованих за ключовими напрямками діяльності ТЛЦ, представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Рекомендовані методики оцінки ризиків залежно від напрямку діяльності ТЛЦ

Напрямок діяльності ТЛЦ та відповідні послуги	Можливі ризики ІБ	Методики оцінки ризиків ІБ
1	2	3
1. <i>Управління складом:</i> приймання, розміщення, крос-докінг; Управління запасами (IoT, RFID), AS/RS; внутрішній транспорт (AGV, конвеєри); облік та звітність (Big Data, AI); відвантаження, комплектація (pick-by-voice/light/vision), повернення; Інтеграція (API) з e-commerce; Хмарні/гібридні WMS	Несанкціонований доступ до критичних операційних даних (запаси, локації, замовлення, терміни придатності).	EBIOS: Аналіз бізнес-ризиків та сценаріїв несанкціонованого доступу. Threat Modeling: Моделювання векторів доступу (інтерфейси, персонал, вразливості). NIST RMF: Оцінка ризиків для визначення необхідних контролів доступу.
	Кібератаки (Ransomware, DDoS, злам акаунтів) на системи WMS/ASRS, що призводять до зупинки операцій, втрати даних.	Threat Modeling (STRIDE, PASTA): Проактивний аналіз архітектури та векторів атак (API, IoT, оператори). FMEA / HAZOP: Аналіз відмов та операційних небезпек в ОТ компонентах (ASRS, AGV, конвеєри), у т.ч. спровокованих кібератаками.
	Втрата або пошкодження цілісності операційних даних (запаси, замовлення) через збої, помилки, людський фактор, кібератаки.	FAIR: Кількісна оцінка фінансових наслідків втрати/недоступності даних. NIST RMF: Загальна оцінка ризиків порушення цілісності даних. НБУ: Для оцінки фінансової стійкості та відповідності регуляторним вимогам.
2. <i>Управління транспортуванням:</i> планування маршрутів (AI/ML); відстеження вантажів (GPS, IoT, телематика); Управління автопарком; інтеграція (API) з біржами; Мобільні додатки для водіїв; АСУР на території; е-документообіг (митниця); доставка «останньої милі» (дрони, роботи).	Неправомірні маніпуляції даними в WMS (кількість, якість, статус) з метою шахрайства, крадіжки, саботажу.	FMEA: Аналіз потенційних відмов процесів обліку та контролю. EBIOS – оцінка ризиків, пов'язаних із неадекватним контролем доступу та розмежуванням повноважень
	Компрометація систем телематики (GPS/IoT), вкл. спуфінг/джамінг: невірне відстеження, зрив графіків, крадіжки.	ORAS: Моделювання ризиків у складних соціотехнічних системах (взаємодія GPS/IoT та людини). Threat Modeling: Аналіз специфічних векторів атак (спуфінг, джамінг).

Продовження табл. 2

1	2	3
	Несанкціонований доступ до конфіденційних логістичних даних (маршрути, графіки, клієнти, водії).	EBIOS: Ідентифікація цінних логістичних даних та аналіз загроз їх конфіденційності.
	Кібератаки на TMS та інтегровані платформи: збої в плануванні, комунікації, обміні даними.	Threat Modeling: Аналіз загроз та вразливостей архітектури TMS та інтегрованих API.
	Зловмисне втручання або технічний збій АСУР / AGV / дронів на території ТЛЦ	HAZOP: Детальний аналіз потенційних відхилень та небезпечних наслідків у роботі систем управління рухом. FMEA: Аналіз відмов компонентів АСУР/AGV/дронів. НБУ: Оцінка операційних ризиків, що можуть мати фінансові наслідки.
	Ризики компрометації даних при обміні з партнерами (митниця, перевізники) через незахищені канали або вразливості їхніх систем.	CORAS: Аналіз ризиків інформаційної взаємодії між організаціями, моделювання довіри. NIST SP 800-161: Управління ризиками ланцюга постачання (SCRM), включаючи партнерів
3. Управління ланцюгами постачання (SCM): прогнозування попиту (AI/ML); автоматизація замовлень (EDI, API); end-to-end visibility (IoT, Blockchain); інтеграція (API) з постачальниками; аналітика SCM (ризики, стійкість).	Атаки на інтерфейси обміну даними (API, EDI) з партнерами (MitM, ін'єкції, проблеми автентифікації).	OWASP (API Security Top 10): Ідентифікація та оцінка технічних вразливостей API. Threat Modeling: Аналіз векторів атак на протоколи та інтерфейси обміну..
	Несанкціонований доступ до стратегічної комерційної інформації SCM (постачальники, ціни, обсяги, контракти).	EBIOS: Оцінка критичності активів SCM та аналіз загроз їх конфіденційності.
	Каскадний ефект від кібератак на партнерів (Supply Chain Attack), що впливає на власні операції, дані, репутацію.	NIST SP 800-161: Комплексне управління ризиками SCRM. MAGERIT: Аналіз залежностей між активами та процесами, включаючи зовнішні системи. CORAS: Моделювання поширення ризиків у ланцюгу постачання.
	Ризики, пов'язані з безпекою даних у хмарних провайдерів та інших сторонніх постачальників ІТ-послуг (SaaS, PaaS).	NIST RMF / SP 800-161: Структуроване управління ризиками третіх сторін.
4. Клієнтський сервіс: онлайн-портали (замовлення, відстеження); мобільні додатки; Чат-боти, вірт. асистенти (AI); персоналізовані пропозиції; інтеграція з CRM	Компрометація облікових записів клієнтів (Account Takeover), доступ до РІІ та історії взаємодії.	OWASP (Top 10, ASVS, Mobile): Ідентифікація вразливостей веб/мобільних додатків. Threat Modeling: Загальний аналіз загроз для процесів автентифікації та управління сесіями. NIST SP 800-63: Оцінка ризиків, пов'язаних з цифровою ідентичністю та автентифікацією.
	Витік комерційної інформації (замовлення, платежі) через вразливості порталів/додатків, помилки конфігурації.	OWASP (Top 10, ASVS, Mobile): Ідентифікація технічних вразливостей, що призводять до витоків. EBIOS: Оцінка ризиків розголошення конфіденційної клієнтської інформації.
	Кібератаки на клієнтські інтерфейси (дефейс, DDoS, XSS, CSRF).	OWASP: Оцінка захищеності від специфічних вебатак, рекомендації Secure SDLC.

Закінчення табл. 2

1	2	3
	Соціальна інженерія (фішинг, вішинг), спрямована на клієнтів для викрадення даних або шахрайства.	EBIOS: Аналіз сценаріїв соціальної інженерії та їх потенційного впливу. NIST SP 800-63 / SP 800-50: Оцінка ризиків, пов'язаних з процесами ідентифікації та ефективністю програм обізнаності.
5. Внутрішні операції: хмарні сервіси (IaaS, PaaS, SaaS); СЕД; RPA; Політики віддаленої роботи, BYOD; корпоративні мобільні пристрої (MDM/EMM).	Несанкціонований доступ до корпоративної мережі та критичних внутрішніх систем (ERP, фінанси, HR).	ISO 27005: Основа для управління ризиками ІБ в рамках СУІБ. NIST RMF: Комплексне управління ризиками для федеральних та критичних систем. Threat Modeling: Ідентифікація векторів проникнення.
	Витік внутрішньої конфіденційної інформації (дані співробітників, фінанси, комерційна таємниця, ІР).	NIST RMF: Управління ризиками конфіденційних даних.
	Кібератаки на ключові елементи ІТ-інфраструктури (сервери, СЗД, мережа), вкл. DoS, експлуатація вразливостей.	IT-Grundschutz: Деталізовані каталоги базових заходів безпеки ("будівельні блоки"). FMEA / HAZOP: Аналіз відмов для критичних компонентів інфраструктури.
	Зараження систем шкідливим ПЗ (віруси, трояни, ransomware) через фішинг, USB, вразливості, інсайдерів.	Threat Modeling: Аналіз та моделювання векторів розповсюдження шкідливого ПЗ. NIST CSF: Комплексний фреймворк, що включає захист від шкідливого ПЗ (Protect, Detect).

Джерело: розроблено авторами.

Представлений підхід, що систематизує рекомендовані методики та стандарти оцінки ризиків ІБ відповідно до ключових напрямів діяльності ТЛЦ, є важливим кроком до структурованого управління безпекою. Таке розбиття на функціональні напрямки допомагає систематизувати аналіз та забезпечує повніше охоплення потенційних проблемних зон. Запропонована структура може слугувати відправною точкою для ТЛЦ будь-якого розміру, однак вона не є догматичною і повинна гнучко адаптуватися під унікальні умови конкретного логістичного центру (специфічні послуги, технології, регуляторні вимоги, наявні ресурси, рівень ризик-апетиту).

Попри переваги структурованого підходу та можливість комбінування методик, їх застосування в контексті ТЛЦ виявляє певні суттєві обмеження:

- стандартні методи часто фокусуються на оцінці ризиків окремих компонентів, недостатньо враховуючи кумулятивні наслідки та системні взаємозв'язки у тісно інтегрованому ІТ/ОТ ландшафті ТЛЦ. Атаки можуть експлуатувати вразливості на стиках систем, призводячи до каскадних ефектів, які важко передбачити при ізольованій оцінці;
- методики загального призначення не завжди повною мірою враховують унікальну специфіку логістичних операцій (критичність своєчасності, фізична взаємодія з товарами, складні ланцюги постачання, специфічні ОТ/ICS системи);
- істотним практичним недоліком багатьох методик є високі вимоги до ресурсів: необхідність залучення експертів з глибокими знаннями в ІБ та логістиці, а також значні витрати на підтримку та актуалізацію процесів оцінки й баз знань.

Ці виявлені обмеження – ризик фрагментарної оцінки, недостатнє врахування системних ефектів та специфіки логістики, високі вимоги до експертизи та ресурсів – вказують на те, що навіть комбінація існуючих стандартних методик може бути недостатньою для адекватного управління ризиками ІБ у сучасних ТЛЦ. Це обґрунтовує нагальну необхідність розробки власної, спеціалізованої методики оцінки ризиків ІБ, цілеспрямованої.

вано створеної для транспортно-логістичних центрів. Така методика має інтегрувати сильні сторони існуючих підходів, але водночас бути адаптованою до специфіки галузі, враховувати системні взаємозв'язки та бути більш ефективною і менш ресурсоємною в реальних умовах функціонування ТЛЦ.

Отже, спеціалізована методика оцінки ризиків ІБ для ТЛЦ має базуватися на динамічній моделі, що передбачає: адаптацію до специфіки та загроз різних типів ТЛЦ; гнучкий вибір заходів безпеки з урахуванням логістичної інфраструктури; застосування релевантних підходів для компонентів ІТ/ОТ систем та бізнес-процесів; швидке оновлення баз знань про загрози для підтримки актуальності оцінки; динамічне моделювання для прогнозування еволюції ризиків та забезпечення проактивного управління ІБ.

Висновки. Забезпечення інформаційної безпеки транспортно-логістичних центрів набуває критичного значення в умовах зростання кіберзагроз, особливо під час воєнних дій, враховуючи їхню роль у підтримці економіки та національної безпеки. Проте аналіз стану досліджень виявив недостатню увагу до специфіки ризиків ІБ саме в цій галузі.

У роботі вирішено завдання систематизації підходів до оцінки ризиків ІБ, актуальних саме для ТЛЦ. На основі аналізу специфіки функціонування ТЛЦ (інтеграція ІТ/ОТ, критичність ланцюгів постачання, підвищені ризики воєнного часу) та огляду існуючих досліджень і стандартів, було: ідентифіковано та класифіковано основні категорії ризиків ІБ, характерні для ТЛЦ; проаналізовано поширені методики та стандарти оцінки ризиків ІБ (ISO 2700x, NIST, CORAS, HAZOP, OWASP, FAIR, FMEA, EBIOS та ін.); обґрунтовано доцільність застосування комбінованого, диференційованого підходу до оцінки ризиків, що поєднує використання комплексних фреймворків (NIST, ISO) із застосуванням спеціалізованих методик для окремих напрямків діяльності ТЛЦ; представлено структуровані рекомендації щодо вибору методик оцінки ризиків ІБ відповідно до специфіки ключових функціональних напрямків ТЛЦ.

Запропонований диференційований підхід та систематизація методик надають практичну основу для ТЛЦ при виборі та впровадженні найбільш адекватних інструментів управління ризиками ІБ в поточних умовах, дозволяючи структурувати цей процес та оптимізувати використання ресурсів.

Однак, незважаючи на переваги структурованого застосування існуючих методик, виявлено їхні суттєві недоліки для комплексного аналізу ТЛЦ: недостатній облік системних взаємозв'язків та кумулятивних ефектів, обмежене врахування специфіки логістичних операцій та високі вимоги до ресурсів. Зважаючи на виявлені обмеження та унікальну складність і критичність ТЛЦ, зроблено висновок про обґрунтовану необхідність розробки нової, комплексної та адаптованої методики оцінки ризиків інформаційної безпеки, спеціально призначеної для транспортно-логістичних центрів.

Список використаних джерел

1. European Confederation of Institutes of Internal Auditing (ECIIA). (2024). Risk in Focus 2025: Hot topics for internal auditors. <https://www.eciia.eu/2024/09/risk-in-focus-2025-hot-topics-for-internal-auditors>.
2. Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України. (n.d.). CERT-UA минулого року опрацювала 4315 кіберінцидентів. <https://cip.gov.ua/ua/news/cert-ua-minulogo-roku-opracyuvala-4315-kiberincidentiv>.
3. 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: Kazymyr, V., et al. Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1091. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_23.
4. Трунов, О. І., Дорош, М. С. (2023). Системи забезпечення інформаційної безпеки для транспортно-логістичних центрів. Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2022: тези доповідей Сімнадцятої міжнародної науково-практичної (С. 7-10). <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/26927>.

5. Обертинюк, І. Л., Кареліна, О.В. (2018). Технології оцінки ризиків інформаційної безпеки відповідно до вітчизняних нормативних документів та міжнародних стандартів. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (С. 132-134). <https://m.tntu.edu.ua/storage/pages/00000742/Book-2-2018.pdf>.
6. Карпович, І. М., Гладка, О. М., Наконечна, Ю. А. (2020). Аналіз ризиків безпеки інформаційної системи ІТ-підприємства. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 31(70), 5, 69–74. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/12>.
7. Карпович, І., Гладка, О., Бухало, Ю. (2021). Технології моделювання і оцінки ризиків інформаційної безпеки. *Технічні науки та технології*, (1(23)), 62–68. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-62-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-62-68).
8. Потій, О., Горбенко, Ю., Замула, О. та Ісірова, К. (2021). Аналіз методів оцінки і управління ризиками кібер-і інформаційної безпеки. *Радіотехніка*, (206), 5-24. <https://doi.org/10.30837/rt.2021.3.206.01>.
9. Kuzminykh, I., Ghita, B., Sokolov, V., & Bakhshi, T. (2021). Information security risk assessment. *Encyclopedia*, 1(3), 602–617. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030050>.
10. Razikin, K., Soewito, B. (2022). Cybersecurity decision support model to designing information technology security system based on risk analysis and cybersecurity framework. *Egyptian Informatics Journal*, 23(3), 383–404. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.03.001>.
11. Schmitz, C., Pape, S. (2020). LiSRA: Lightweight security risk assessment for decision support in information security. *Computers & Security*, Article 101656. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101656>.
12. Loft, P., He, Y., Yevseyeva, I., Wagner, I. (2022). CAESAR8: an agile enterprise architecture approach to managing information security risks. *Computers & Security*, 122, Article 102877. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102877>.
13. Irsheida, A., Murada, A., AlNajdawia, M., Qusefa A. (2022). Information security risk management models for cloud hosted systems: A comparative study. *Procedia Computer Science*, 204, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.025>.
14. Bernsmed, K., Bour, G., Lundgren, M., Bergström, E. (2022). An evaluation of practitioners' perceptions of a security risk assessment methodology in air traffic management projects. *Journal of Air Transport Management*, 102, 102223. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102223>.
15. Gunes, B., Kayisoglu, G., Bolat, P. (2021). Cyber security risk assessment for seaports: A case study of a container port. *Computers & Security*, 103, 102196, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102196>.
16. Liang, L., Wu, X., Deng J., Lv, X. (2022). Research on risk analysis and governance measures of open-source components of information system in transportation industry. *Procedia Computer Science*, 208, 106-110. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.10.017>.
17. Alfarisi, S., Surantha, N. (2022). Risk assessment in fleet management system using OCTAVE allegro. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(1), 530–540. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i1.3241>.
18. Melnychenko, O., Ignatenko, O., Tsybulskyi, V., Degtiarova, A., Kashuba, M., & Derehuz, I. (2024). Development of a mechanism for information security risk management of transport service provision systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(127)), 27-36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298144>.
19. Haji, S., Tan, Q., Costa, R. S. (2019). A Hybrid Model for Information Security Risk Assessment. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1.1), 100–106. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1981.12019>.
20. Національний банк України. (2011, 3 березня). Щодо впровадження системи управління інформаційною безпекою та методики оцінки ризиків відповідно до стандартів Національного банку України: 1 Лист № 24-112/365. Верховна Рада України. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0365500-11#Text>.
21. NIST SP 800-37 Rev. 2. Risk Management Framework for Information Systems and Organizations: A System Life Cycle Approach for Security and Privacy. (2018). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-37r2>.

22. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection – Guidance on managing information security risks (ISO/IEC 27005:2022). <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80585/7bca93ac16fd426a9bc717cad9284d9/ISO-IEC-27005-2022.pdf>.
23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements (ISO/IEC 27001:2022).
24. Lund, M. S., Stølen, K., & Vraalsen, F. (2011). Model-Driven Risk Analysis: The CORAS Approach. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12323-8>.
25. International Electrotechnical Commission. (2016). Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide (IEC 61882:2016).
26. UcedaVélez, T., & Morana, M. M. (2015). Risk Centric Threat Modeling: Process for Attack Simulation and Threat Analysis. Wiley.
27. OWASP Foundation. (n.d.). OWASP Foundation | Open Source Foundation for Application Security. <https://owasp.org>.
28. Freund, J., & Jones, J. (2014). Measuring and Managing Information Risk: A FAIR Approach. Butterworth-Heinemann.
29. International Electrotechnical Commission. (2018). Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (IEC 60812:2018).
30. Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI). (2018). EBIOS Risk Manager – The method. <https://www.ssi.gouv.fr/en/guide/ebios-risk-manager-the-method>.

References

1. European Confederation of Institutes of Internal Auditing (ECIIA). (2024). Risk in Focus 2025: Hot topics for internal auditors. <https://www.eciia.eu/2024/09/risk-in-focus-2025-hot-topics-for-internal-auditors>.
2. Derzhavna sluzhba spetsialnoho zv'iazku ta zakhystu informatsii Ukrainy [State Service of Special Communications and Information Protection of Ukraine]. CERT-UA mynuloho roku opratsiuvala 4315 kiberintsyidentiv [CERT-UA processed 4315 cyber incidents last year]. <https://cip.gov.ua/ua/news/cert-ua-minulogo-roku-opracyuvala-4315-kiberincidentiv>.
3. 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 et al. (Eds.), *Mathematical modeling and simulation of systems. MODS 2023. Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 1091). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67348-1_23.
4. Trunov, O. I., & Dorosh, M. S. (2023). Systemy zabezpechennia informatsiinoi bezpeky dlia transportno-lohistychnykh tsentriv [Information security systems for transport and logistics centers]. In *Matematychni ta imitatsiine modeliuвання system. MODS 2022: tezy dopovidei Simnadsiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Mathematical and simulation modeling of systems. MODS 2022: Abstracts of the Seventeenth International Scientific and Practical Conference* (pp. 7-10). Chernihiv Polytechnic National University. <http://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/26927>.
5. Obertyniuk, I. L., & Karelina, O. V. (2018). Tekhnologii otsinky ryzykiv informatsiinoi bezpeky vidpovidno do vitchyznianskykh normatyvnykh dokumentiv ta mizhnarodnykh standartiv [Information security risk assessment technologies according to domestic regulations and international standards]. In *Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologii: zb. tez dopovidei mizhnar. nauk.-tekhn. konf. Molodykh uchenykh ta studentiv – Current problems of modern technologies: Collection of abstracts of the international scientific and technical conference of young scientists and students*, (pp. 132-134). Ternopil Ivan Puluj National Technical University. <https://m.tntu.edu.ua/storage/pages/00000742/Book-2-2018.pdf>.
6. Karpovych, I. M., Hladka, O. M., & Nakonechna, Yu. A. (2020). Analiz ryzykiv bezpeky informatsiinoi systemy IT-pidpriemstva [Analysis of security risks of the information system of an IT enterprise]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 31(70), 5, 69–74. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/12>.
7. Karpovych, I., Hladka, O., & Bukhalo, Yu. (2021). Tekhnologii modeliuвання i otsinky ryzykiv informatsiinoi bezpeky [Technologies for modeling and assessment of information security risks]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, (1(23)), 62–68. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-62-68](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-62-68).

8. Potii, O., Horbenko, Yu., Zamula, O., & Isirova, K. (2021). Analiz metodov otsenky y upravleniya kyberryskamy y ynformatsyonnoi bezopasnostiu [Analysis of methods for assessing and managing cyber risks and information security]. *Radyotekhnika – Radio Engineering*, (206), 5–24. <https://doi.org/10.30837/rt.2021.3.206.01>.
9. Kuzminykh, I., Ghita, B., Sokolov, V., & Bakhshi, T. (2021). Information security risk assessment. *Encyclopedia*, 1(3), 602–617. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1030050>.
10. Razikin, K., Soewito, B. (2022). Cybersecurity decision support model to designing information technology security system based on risk analysis and cybersecurity framework. *Egyptian Informatics Journal*, 23(3), 383–404. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2022.03.001>.
11. Schmitz, C., Pape, S. (2020). LiSRA: Lightweight security risk assessment for decision support in information security. *Computers & Security*, 101656. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101656>.
12. Loft, P., He, Y., Yevseyeva, I., Wagner, I. (2022). CAESAR8: an agile enterprise architecture approach to managing information security risks. *Computers & Security*, 122, 102877. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2022.102877>.
13. Irsheida, A., Murada, A., AlNajdawia, M., Qusefa, A. (2022). Information security risk management models for cloud hosted systems: A comparative study. *Procedia Computer Science*, 204, 205–217. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.025>.
14. Bernsmed, K., Bour, G., Lundgren, M., Bergström, E. (2022). An evaluation of practitioners' perceptions of a security risk assessment methodology in air traffic management projects. *Journal of Air Transport Management*, 102, 102223. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2022.102223>.
15. Gunes, B., Kayisoglu, G., Bolat, P. (2021). Cyber security risk assessment for seaports: A case study of a container port. *Computers & Security*, 103, 102196. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2021.102196>.
16. Liang, L., Wu, X., Deng, J., Lv, X. (2022). Research on risk analysis and governance measures of open-source components of information system in transportation industry. *Procedia Computer Science*, 208, 106–110. DOI: 10.1016/j.procs.2022.10.017.
17. Alfarisi, S., Surantha, N. (2022). Risk assessment in fleet management system using OCTAVE allegro. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 11(1), 530–540. <https://doi.org/10.11591/eei.v11i1.3241>.
18. Melnychenko, O., Ignatenko, O., Tsybul'skyi, V., Degtiarova, A., Kashuba, M., & Derehuz, I. (2024). Development of a mechanism for information security risk management of transport service provision systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3(127)), 27–36. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298144>.
19. Haji, S., Tan, Q., Costa, R. S. (2019). A Hybrid Model for Information Security Risk Assessment. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(1.1), 100–106. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1981.12019>.
20. National Bank of Ukraine. (2011, March 3). Shchodo vprovadzhennia systemy upravlinnia informatsiinoiu bezpekoiu ta metodyky otsinky ryzykiv vidpovidno do standartiv Natsionalnoho banku Ukrainy: Lyst № 24-112/365 [Regarding the implementation of the information security management system and risk assessment methodology in accordance with the standards of the National Bank of Ukraine: Letter No. 24-112/365]. *Verkhovna Rada of Ukraine*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0365500-11#Text>.
21. NIST SP 800-37 Rev. 2. Risk Management Framework for Information Systems and Organizations: A System Life Cycle Approach for Security and Privacy. (2018). <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-37r2>.
22. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). Information security, cybersecurity and privacy protection — Guidance on managing information security risks (ISO/IEC 27005:2022). <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/80585/7bca93ac16fd426a9bc717cad9284d9/ISO-IEC-27005-2022.pdf>.
23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2022). *Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements* (ISO/IEC 27001:2022).
24. Lund, M. S., Stølen, K., & Vraalsen, F. (2011). Model-Driven Risk Analysis: The CORAS Approach. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12323-8>
25. International Electrotechnical Commission. (2016). Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide (IEC 61882:2016).

26. UcedaVélez, T., & Morana, M. M. (2015). Risk Centric Threat Modeling: Process for Attack Simulation and Threat Analysis. Wiley.
27. OWASP Foundation. (n.d.). OWASP Foundation. Open Source Foundation for Application Security. <https://owasp.org>.
28. Freund, J., & Jones, J. (2014). Measuring and Managing Information Risk: A FAIR Approach. Butterworth-Heinemann.
29. International Electrotechnical Commission. (2018). Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA) (IEC 60812:2018).
30. Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI). (2018). EBIOS Risk Manager – The method. <https://www.ssi.gouv.fr/en/guide/ebios-risk-manager-the-method>.

Отримано 05.05.2025

UDC 004.056:656

Trunov Oleksii¹, Dorosh Mariia²

¹PhD student, Lecturer at the Department of Information Technology and Software Engineering
E-mail: alexeytrunov1995@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0321-2669>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)
E-mail: m.dorosh@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6537-9857>
ResearcherID: AAF-2603-2019. Scopus Author ID: 56912183600

SYSTEMATIZATION OF APPROACHES TO THE INFORMATION SECURITY RISK ASSESSMENT OF TRANSPORTATION AND LOGISTICS CENTERS

Relevance of the study is driven by significant and constant growth of cyber threats to critical infrastructure, in particular to transport and logistics centers (TLCs), which are key nodes in global supply chains. Attacks on TLCs lead to serious consequences, namely: financial losses, disruption of logistics, and data compromise. This creates urgent need for effective approaches to information security (IS) risk management adapted to the specifics of the TLC. Existing methods for assessing IS risks do not sufficiently take into account unique operational processes, integrated IT and OT systems, and technological landscape of TLCs, which jeopardizes their sustainability.

The main problem addressed in this study is fragmentation of knowledge and insufficient adaptation of existing IS risk assessment methodologies to the specific conditions of TLCs. General approaches do not take into account unique attack vectors (via WMS, TMS), specific IT/OT vulnerabilities (SCADA), and cascading effects on physical operations. This mismatch makes it difficult to build effective cyber defense, which is critical for the sustainability of operations and data protection.

The purpose of the article is to comprehensively systematize existing approaches to assessing IS risks, identify their advantages/disadvantages, and determine their relevance to TLCs.

The study analyzed scientific works, standards and practices, which confirmed insufficient coverage of the specifics of TLCs' IS. The categories of security risks for TLCs are systematized. Risk assessment methodologies (FAIR, EBIOS, NIST, ISO/IEC 27005:2023, etc.) are classified and compared, their suitability for TLC is assessed, and advantages, disadvantages, and difficulties of adaptation are identified. The use of the combined, multi-level approach to selection of methods is proposed.

The scientific novelty lies in development of classification and systematization of modern methods of assessing IS risks for TLC, as well as in the analysis of relationships between risk assessment methods, attack detection methods and approaches to their implementation in the context of TLC. This forms the knowledge base for making informed decisions by the TLC management on IS management. Practical value is possibility of improving the cybersecurity of TLCs through implementation of the recommended combined approach. At the same time, limitations of existing methods have been identified, including: fragmentation, insufficient consideration of the specifics of TLCs (especially IT/OT convergence) and potential resource intensity.

Conclusions confirm achievement of the goal and substantiate urgent need for further research to develop the integrated, specialized methodology for assessing IS risks specifically for TLCs.

Keywords: information security risk; transport and logistics center; risk assessment; risk assessment methodology; critical infrastructure.

Fig.: 1. Table: 4. References: 30.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-221-233](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-221-233)

УДК 37.091.3:004.9:378.018.43

Хижняк Андрій Васильович¹, Пріла Ольга Анатоліївна²¹аспірант, 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>²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: olga.prila1986@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0884-6516>

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ПЕРЕВІРКИ ПАРАМЕТРИЗОВАНИХ ПРАКТИЧНИХ ЗАВДАНЬ

У роботі представлена модель системи автоматизованої генерації унікальних (параметризованих) практичних завдань та їх подальшої автоматичної перевірки з підтримкою функції автоматичного розгортання ізольованих та контрольованих індивідуальних навчальних середовищ для виконання цих завдань, що реалізує розроблену авторами інформаційну технологію. Для визначення компонентів, їх структурування і об'єднання в систему, а також для зниження складності системи шляхом абстракції і розмежування повноважень розроблена архітектура системи та описане функціональне призначення кожного модуля системи. Сформовані пропозиції щодо впровадження і використання розробленої системи в освітню діяльність.

Ключові слова: параметризовані практичні завдання; автоматична генерація; автоматичне оцінювання; дистанційна навчальна екосистема; віртуальні середовища.

Рис.: 12. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність дослідження. Дистанційний формат навчання породжує нові виклики для викладачів: проблема академічної доброчесності набуває особливої гостроти, оскільки контроль за самостійністю виконання завдань істотно послаблюється. Багато дослідників (Dr. Robert Stevens, Dr. Lawrence Silver, Dr. Rhonda Richards, Dr. Kitty Campbell) підкреслюють той факт, що випадки академічного шахрайства в онлайн-освіті є складнішими для виявлення [1].

Серед форм академічного шахрайства можна виділити наступні: консультування з третіми особами під час онлайн-іспитів та передавання облікових даних для проходження оцінювання іншими особами [2]. Також студенти активно застосовують технічні засоби для обміну відповідями, отримання сторонньої допомоги під час іспитів та використання генеративних інструментів штучного інтелекту для отримання відповідей [3].

Власні дослідження автора підтверджують ці тенденції: у ході експерименту з дисципліни «Операційні системи Unix» у 2023/2024 навчальному році було виявлено, що 6,7 % студентів використовували ШІ для фальсифікації відповідей, а 16,7 % — графічні редактори. Це лише виявлені випадки, реальні масштаби проблеми, імовірно, є значно більшими: згідно з опитуванням, проведеним Маликом [4], 60 % респондентів зізналися в регулярному списуванні під час онлайн-іспитів.

Для запобігання списуванню застосовуються різноманітні методики, зокрема спеціалізовані програмні рішення для аналізу рухів, сканування очей, відстеження натискань клавіш, моніторингу середовища виконання завдань (так зване proctoring software). Серед популярних рішень можна виділити AIProctor, ProctorU, Proctortrack, Proctorio та Smowl [5].

Значний прогрес спостерігається також у застосуванні штучного інтелекту для виявлення підозрілої поведінки студентів. Так, наприклад, AIProctor інтегрується з LMS, фіксує обличчя та ідентифікатори студентів, здійснює 360-градусне сканування аудиторії, а також аналізує положення та рухи голови для виявлення можливих порушень [6]. Незважаючи на застосування алгоритмів ШІ, для повноцінної перевірки відеозаписів все ще потрібен ручний перегляд, що ускладнює масштабування процесу і викликає занепокоєння щодо конфіденційності.

Постановка проблеми. Одним із ефективних способів зменшення випадків шахрайства є впровадження такого формату навчання, коли кожному студенту пропонується власне завдання на основі унікального набору параметрів або початкових умов. Цей підхід можна визначити термінами «parameterized personalization» або «variant-

based personalization». Такі завдання зберігають загальну методичну структуру, але забезпечують індивідуальність кожного варіанту. Сучасні технології надають поштовху для пошуку інструментів, які забезпечать автоматизовану генерацію процесів створення та оцінювання персоналізованих практичних завдань, а також для автоматичного розгортання і налаштування ізольованих та контрольованих середовищ, в яких студенти зможуть виконувати лабораторні практичні завдання, при цьому підтримуючи асинхронний дистанційний формат навчання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розробка інструментів для автоматизованої генерації та оцінювання персоналізованих завдань є предметом активного наукового пошуку. У статті «Designing Programming Assignments to Reduce the Likelihood of Cheating» [7] розглядаються методи створення унікальних завдань для кожного студента як ефективний захід боротьби зі списуванням.

Фреймворк SERA [8] забезпечує гнучку платформу для проведення лабораторних вправ для курсів з безпеки та автоматизації їхнього оцінювання. Система складається з кількох компонентів (SERA Engine = Генератор+Валідатор+Монітор), модулів та утиліт для створення персоналізованих завдань та їхньої перевірки.

У цьому дослідженні [9] представлено систему, яка автоматично генерує персоналізовані практичні завдання для студентів та інструментарій для автоматизованого налаштування лабораторного середовища з унікальною конфігурацією для кожного студента. Використання таких індивідуалізованих завдань сприяє зменшенню випадків академічної нечесності та несанкціонованої співпраці та підвищенню залученості студентів у навчальний процес.

Наукова робота «The Design and Implementation of PAGE: Personalised Assessment Generative Engine» презентує PAGE – інструмент, розроблений для спрощення створення та адміністрування персоналізованих цифрових оцінювань у системі управління навчанням Canvas. [10]. Автори демонструють, що автоматизоване створення унікальних завдань для кожного студента є ефективним підходом для зменшення списування та підвищення залученості в освітньому процесі.

Автори роботи [11] також працюють над інструментом оцінювання, що використовує параметризацію задач та автоматизовану перевірку рішень у курсі з основ програмування.

Останні дослідження демонструють також зацікавленість у використанні генеративного штучного інтелекту для створення персоналізованих завдань. Зокрема, у роботі E.Logacheva та ін. «Evaluating Contextually Personalized Programming Exercises Created with Generative AI» аналізується використання GPT-4 для автоматичного генерування індивідуалізованих завдань у курсах з програмування [12].

Ретельний аналіз публікацій та літератури виявив необхідність формування методів, інформаційної технології та інших інструментів, які б забезпечили автоматизовану генерацію та оцінювання персоналізованих практичних завдань, включаючи автоматичне розгортання і налаштування середовищ, у яких студенти можуть виконувати лабораторні практичні завдання, та підтверджує актуальність дослідження.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Головним недоліком впровадження індивідуальних завдань залишається значне навантаження на викладачів через необхідність ручного створення та перевірки великої кількості унікальних варіантів, що зумовлює актуальність автоматизації цього процесу.

Мета і задачі дослідження. Метою цього дослідження (науковим завданням) є підвищення рівня академічної доброчесності та якості контролю знань зі зменшенням витрат часу викладачами на створення та перевірку практичних завдань студентів. Завдання дослідження:

- проаналізувати поточний стан створення і видачі персональних (варіативних або параметризованих) завдань на кафедрі;
- розробити систему, що реалізує інформаційну технологію автоматизованої генерації унікальних (параметризованих) практичних завдань, автоматичного розгортання індивідуальних навчальних середовищ для виконання цих завдань та їх подальшої автоматичної перевірки
- оцінити рівень ефективності таких завдань порівняно з неунікальними (не параметризованими завданнями),
- сформулювати пропозиції щодо впровадження і використання розробленої інформаційної технології, направленої виконання поставленої мети дослідження.

Виклад основного матеріалу. З метою проведення аналізу поточного стану створення і видачі персональних (варіативних або параметризованих) завдань в НУ “Чернігівська Політехніка” було проведено опитування викладачів інженерних кафедр. Згідно результатів опитування і спілкування з викладачами абсолютна більшість викладачів зазначають, що вважають доцільним використання індивідуальних (варіативних або параметризованих) практичних завдань і намагаються використовувати їх в своїй викладацькій роботі, хоч і в обмеженому вигляді. Викладачі, які не використовують індивідуальні завдання, відмічають, що хотіли б застосовувати їх в освітній діяльності. Серед причин НЕ використання таких завдань насамперед називають великі часові витрати, які необхідні для підготовки та перевірки таких завдань, а також важкість процесу ручної генерації завдань.

Розрахуємо середньостатистичні часові витрати викладача для створення унікальних завдань в рамках курсу “Операційні системи Unix”, спираючись на дані по кількості студентів за останні 5 років (дисципліна викладається студентам на третьому курсі). Дані отримані від деканату Навчально-наукового інституту електронних та інформаційних технологій Національного університету “Чернігівська Політехніка”.

Таблиця 1 – Кількість студентів на 3 курсі спеціальності 123 за 2021-2025 рр.

Роки навчання	Кількість студентів на 3 курсі
2024-2025	92
2023-2024	105
2022-2023	131
2021-2022	95

Джерело: розроблено авторами.

У середньому в потоці маємо 105 студентів. Кількість лабораторних робіт у курсі «Операційні системи Unix» становить 6 (шість). Для підготовки 105 унікальних варіантів завдань для кожної лабораторної роботи, включаючи заповнення завдання в LMS та його подальшу ручну перевірку, потрібно не менше 15 хвилин. Отже, тільки на підготовку та перевірку виконаних практичних завдань для однієї дисципліни викладач має витратити $105 \cdot 15 \cdot 6 = 9540$ хв (157 годин), що в 6 разів перевищує обсяг годин, виділених на цей вид робіт і займає 75 % всіх виділених на дисципліну годин (за навантаженням викладача на дисципліну виділяється 207 годин, з них лише 25,6 годин безпосередньо на перевірку лабораторних робіт).

Інформаційна технологія для вирішення поставленої задачі включає в себе систему автоматизованої генерації унікальних (параметризованих) практичних завдань, автоматичного розгортання індивідуальних навчальних середовищ для виконання цих завдань та їх подальшої автоматичної перевірки.

Для визначення компонентів, їх структурування і об'єднання в систему, а також для зниження складності системи шляхом абстракції та розмежування повноважень розроблена архітектура системи, представлена на рис. 1.

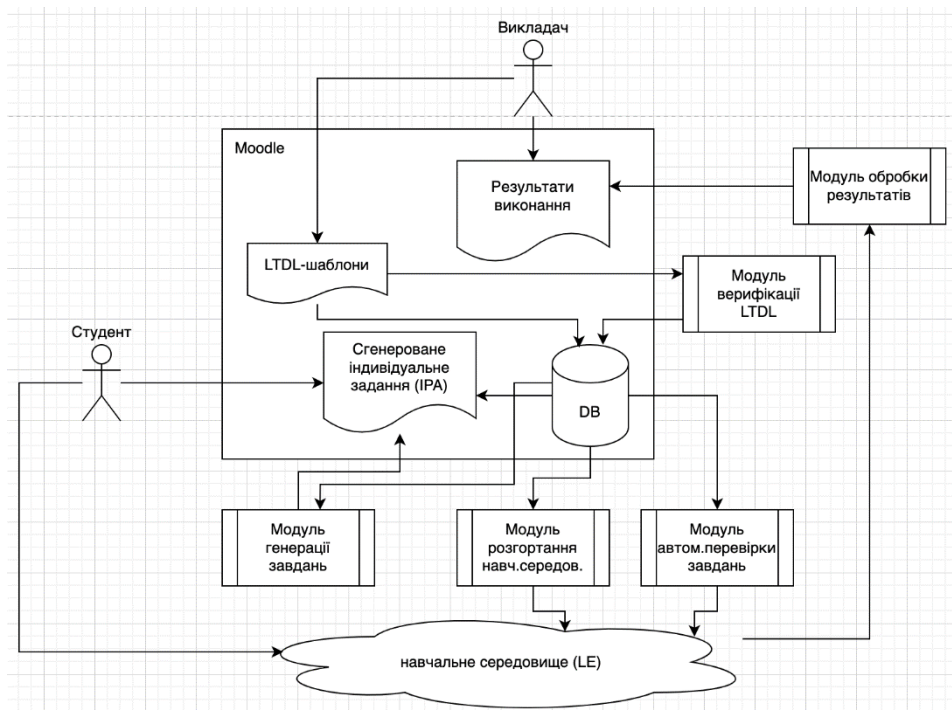


Рис. 1. Архітектура системи

Джерело: розроблено авторами.

Система складається із 5 модулів: модулю генерації завдань, модулю верифікації LTDL, модулю розгортання навчального середовища, модулю автоматичної перевірки завдань та модулю обробки результатів виконання. Функціональне призначення модулів представлено на наступному рис. 2.

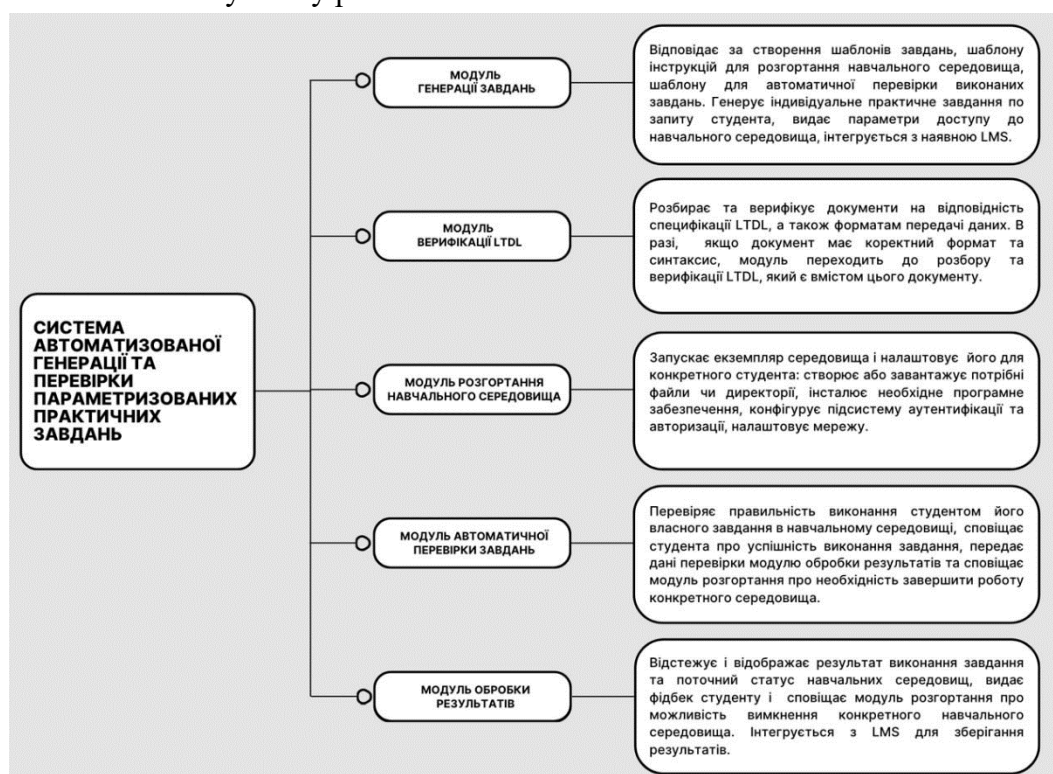


Рис. 2. Функціональне призначення модулів системи

Джерело: розроблено авторами.

Розглянемо детальніше кожен модуль, його функціональне призначення, місце в архітектурі та взаємозв'язки з іншими компонентами системи.

Модуль генерації завдань.

Модуль відповідає за створення індивідуальних практичних завдань студентів, інтегрується з наявною LMS і дозволяє створити individualized practical assignment (далі по тексту IPA) в рамках вивчення якоїсь теми або групи тем обраної дисципліни. В LMS Moodle, з якою автори інтегрували систему, створюється новий тип питання, яке можна використовувати для стандартних moodle-активностей типу Quizz, Lesson etc.

За допомогою цього модулю і спеціально розробленої мови Learning Task Definition Language викладач задає такі шаблони:

a) student assignment template - шаблон завдання, яке буде використане для генерації параметризованого завдання для конкретного студента з певним набором унікальних змінних параметрів.

Для ілюстрації роботи модулю візьмемо приклад з дисципліни “Операційні системи” по темі вивчення роботи з архівами і створимо IPA. Мета завдання - перевірити навички студента користуватися командами роботи з архівами. Ціллю виконання завдання буде створення архіву із відповідними файлами всередині. Таким чином у нас буде 2 етапи: пошук потрібних файлів та створення архіву.

Для завдання з автоматичною перевіркою student assignment template має такий вигляд:

```
Зайдіть на віддалену систему, використовуючи наступні дані:
ім'я користувача {{login}}
пароль користувача {{password}}
host {{IP}}

Знайдіть в директорії з іменем "{{dir_name}}" файли, які містять в своїй назві символи "{{symbols}}".
Заархівуйте знайдені файли в архів з іменем {{arch_name}}.tgz і помістіть його в директорію з іменем "{{dir_name}}".
```

Рис. 3. Вигляд шаблону “student assignment template”

Джерело: розроблено авторами.

б) learning environment creation instructions template - набір інструкцій для модуля №3, який відповідає за розгортання learning environment (LE). У цьому шаблоні вказується тип обраного LE та перелік дій або команд, які повинні бути виконані модулем для правильного розгортання і налаштування цього навчального середовища.

Оскільки для виконання параметризованого завдання студент повинен отримати не тільки опис завдання, але і параметри доступу до навчального середовища, то перед видачею завдання студенту треба його персональне навчальне середовище запустити. Розглянемо варіанти інструкцій розгортання для різних бекендів:

Для запуску навчального середовища на основі віртуальної машини з ОС Linux Ubuntu 24.04 і гіпервізора VirtualBox learning environment creation instructions template повинен мати такі інструкції:

```
LE type: Virtual Machine
LE provider: virtualbox
LE version: Linux Ubuntu 24.04
LE parameters: host: {{IP}}, username: {{username}}, password: {{password}}
LE create instructions: [VBoxManage startvm "Linux Ubuntu 24.04" --type headless ]
LE provision instructions: [
    create user {{username}},
    echo {{password}} | passwd {{username}},
    ip a add {{IP}}/24 dev enp0s3
]
```

Рис. 4. Приклад інструкцій для запуску LE на основі ВМ з ОС Linux Ubuntu 24.04 і гіпервізора VirtualBox

Джерело: розроблено авторами.

Для запуску навчального середовища на основі контейнера з ОС Linux Ubuntu 24.04 і платформи Docker потрібно задати наступні інструкції у відповідних секціях learning environment creation instructions template. Ці інструкції будуть пізніше використані модулем розгортання для запуску конкретного екземпляру LE відповідного бекенду.

```
LE type: container
LE provider: docker
LE version: ubuntu24.04
LE parameters: host: {{IP}}, username: {{username}}, password: {{password}}, filename:{{file_name}}, token:{{token}}
LE create instructions: [docker run --net base --ip 172.18.0.22 -it ubuntu24.04 bash]
LE provision instructions: [
docker exec -it my_container sh -c "create user {{username}}",
docker exec -it my_container sh -c "echo {{password}} | passwd {{username}}",
docker exec -it my_container sh -c "ip a add {{IP}}/24 dev enp0s3"
docker exec -it my_container sh -c "echo {{token}} > /usr/{{file_name}}"
]
```

Рис. 5. Приклад інструкцій для запуску LE на основі контейнера з ОС Linux Ubuntu 24.04 і платформи Docker

Джерело: розроблено авторами.

в) IPA verification instructions template - набір інструкцій для модуля №4 автоматичної перевірки IPA, згідно яких фіксується успішність виконання завдання в навчальному середовищі.

Для наведеного прикладу із створенням архіву в шаблоні повинні бути вказані такі інструкції:

```
LE parameters: host: {{IP}}, username: {{username}}, password: {{password}}
LE connect protocol: [ssh]
LE check instructions: [tar -tvzf /home/{{username}}/{{dir_name}}/{{arch_name}} | grep "{{symbols}}"]
```

Рис. 6. Приклад IPA verification instructions template

Джерело: розроблено авторами.

При отриманні запиту від студента на виконання завдання модуль генерації завдань по шаблону “student assignment template” сформує унікальне параметризоване завдання і надасть параметри доступу до навчального середовища, де це завдання повинно бути виконано.

```
Зайдіть на віддалену систему, використовуючи наступні дані:
ім'я користувача RM634oi
пароль користувача Jtu725430
host 10.10.10.10

Знайдіть в директорії з іменем "Wjh381" файли, які містять в своїй назві символи "Soho".
Заархівуйте знайдені файли в архів з іменем Arch87.tgz і помістіть його в директорію з іменем " Wjh381".
```

Рис. 7. Унікальне параметризоване завдання і параметри доступу до навчального середовища, які безпосередньо отримує студент.

Джерело: розроблено авторами.

Модуль верифікації LTDL.

Для створення вказаних шаблонів пропонується використовувати спеціально розроблений для цієї мети Learning Task Definition Language (LTDL). Документи LTDL в подальшому будуть перетворені на опис конкретного унікального завдання, конфігураційні файли систем розгортання для хмарних сервісів або конфігураційних файлів Docker-контейнерів чи віртуалізаторів на кшталт VirtualBox, VMWare, Vagrant.

Створені за допомогою web-інтерфейсу шаблони зберігаються в існуючій базі даних LMS та можуть бути в подальшому змінені, оновлені чи експортовані в один з форматів зберігання даних, наприклад JSON. Також модуль дозволяє імпорт шаблонів з підтримуваних форматів.

Для функціонування системи модуль генерації завдань повинен створити коректний LTDL-документ, який в подальшому буде використовуватися іншими модулями: модулем розгортання LE та модулем автоматичної перевірки IPA. Для цього всі модулі системи будуть використовувати модуль верифікації LTDL, задача якого:

- спочатку провести розбір та верифікацію документу на відповідність специфікації LTDL, а також форматам передачі даних JSON, YAML тощо.
- якщо документ має коректний формат та синтаксис, модуль переходить до розбору та верифікації LTDL, який є вмістом цього документу.

Модуль розгортання LE.

Задача модуля - розгорнути індивідуальне середовище для виконання IPA конкретним студентом згідно інструкцій. Ці інструкції, зокрема, визначають, який тип середовища треба розгорнути: окрему віртуальну машину, LXC\docker контейнер, хмарний сервіс, JupiterLab тощо.

В залежності від обраного типу середовища модуль запускає екземпляр LE і виконує перелік дій, які налаштують конкретний екземпляр LE для конкретного студента: створить або завантажить потрібні файли чи директорії, інсталує необхідне програмне забезпечення, сконфігурує підсистему аутентифікації та авторизації, налаштує мережу.

Для виконання цих задач модуль повинен отримати інструкції від LMS у вигляді LTDL-документу і провести верифікацію цього документу за допомогою відповідного модулю. Коли конкретний студент створить запит на виконання свого завдання, модуль розгортання отримає LTDL-документ з необхідними для створення LE параметрами. Розглянемо кілька прикладів передачі даних.

```
{
  "LE_type": "Virtual Machine",
  "LE_provider": "virtualbox",
  "LE_version": "Linux Ubuntu 24.04",
  "LE_parameters": {
    "host": "10.10.10.10",
    "username": "PM634oi",
    "password": "Jru725430"
  },
  "LE_create_instructions": [
    "VBoxManage startvm \"Linux Ubuntu 24.04\" --type headless"
  ],
  "LE_provision_instructions": [
    "create user PM634oi",
    "echo Jru725430 | passwd PM634oi",
    "ip a add 10.10.10.10/24 dev enp0s3"
  ]
}
```

Рис. 8. Інструкції для бекенду VirtualBox у вигляді JSON-файлу

Джерело: розроблено авторами.

```
LE_type: container
LE_provider: docker
LE_version: ubuntu24.04
LE_parameters:
  host: "{{IP}}"
  username: "{{username}}"
  password: "{{password}}"
  filename: "{{file_name}}"
  token: "{{token}}"
LE_create_instructions:
  - "docker run --net base --ip 172.18.0.22 -it ubuntu24.04 bash"
LE_provision_instructions:
  - "docker exec -it my_container sh -c \"create user {{username}}\""
  - "docker exec -it my_container sh -c \"echo {{password}} | passwd {{username}}\""
  - "docker exec -it my_container sh -c \"ip a add {{IP}}/24 dev enp0s3\""
  - "docker exec -it my_container sh -c \"echo {{token}} > /usr/{{file_name}}\""
```

Рис. 9. Інструкції для Docker-бекенду у вигляді YAML-файлу

Джерело: розроблено авторами.

Результат розгортання LE модуль повертає у вигляді відповідного статусу і в подальшому виконує його контроль. Конфігураційні параметри навчального середовища будуть використані модулем верифікації при підключенні до екземпляру LE для проведення верифікації і формування звіту про прогрес виконання завдання та його фінальні результати. Модуль також виконує функції згортання або знищення непотрібних LE, для цього він взаємодіє з модулем автоматичної перевірки завдань та з модулем обробки результатів, від яких в певний момент отримує сигнал на завершення роботи відповідного LE.

Модуль автоматичної перевірки IPA.

Задача модуля - перевірити правильність виконання студентом його власного завдання в окремому індивідуальному навчальному середовищі згідно отриманих інструкцій. Спочатку цей модуль також використовує модуль верифікації LTDL для перевірки коректності отриманих інструкцій.

Згідно з отриманими інструкціями модуль виконує підключення до конкретного навчального середовища з використанням відповідних параметрів для аутентифікації та авторизації та перевіряє чи виконане завдання. Підключення та перевірка виконується з певною, заданою наперед в LTDL-інструкціях, періодичністю, наприклад, кожні 5 або 10 хвилин. У разі успішного виконання завдання (чи переліку завдань) модуль виконує наступні дії: сповіщає студента про успішність виконання завдання, передає дані перевірки модулю обробки результатів та сповіщає модуль розгортання про необхідність завершити роботу конкретного середовища. Якщо модуль не зміг підключитися до навчального середовища, він сповіщає про це модуль обробки результатів.

Для проведення автоматичної перевірки в рамках роботи із Модулем №1 було створено IPA verification instructions template, згідно якого модуль автоматичної перевірки отримає наступний JSON-файл:

```

"LE_parameters": {
  "host": "10.10.10.10",
  "username": "PM634oi",
  "password": "Jru725430"
},
"LE_connect_protocol": [ ssh ],
"LE_check_instructions": [tar -tvzf /home/PM634oi/Wjh381/Arch87.tgz | grep "Soho"]
}

```

Рис. 10. JSON-файл для перевірки виконання завдання студентом

Джерело: розроблено авторами.

Модуль обробки результатів.

Задача модуля полягає у відстеженні і відображенні результатів виконання завдання. Загальний вигляд результату виконання завдання залежить від налаштувань конкретної LMS і може мати як фіксований набір значень: “виконане”, “спроба провалена”, “термін виконання сплив” так і прогрес виконання у відсотках.

Також модуль відображає поточний статус навчальних середовищ. Статус навчальних середовищ модуль отримує від модулю розгортання або від модулю автоматичної перевірки завдань. Можливі статуси навчального середовища: “не створене”, “створене”, “помилка створення”, “запущене”, “скасоване”, “завершене”.

Результати виконання завдання даний модуль отримує від модулю автоматичної перевірки завдань та/або студента, якщо система функціонує в напівавтоматичному режимі, адже не для всіх типів завдань потрібна автоматична перевірка виконання.

Іноді в рамках виконання завдання студенту треба виконати якусь послідовність дій для отримання якогось результату чи об'єкту. Наприклад, є потреба в перевірці навичок пошуку файлів. Система підтримує створення таких завдань в частині генерації параметризованого завдання, розгортання навчального середовища та отримання результату від студента. У такому режимі роботи системи після виконання завдання студент вводить відповідь вручну у відповідне поле в LMS.

Для такого завдання з напівавтоматичною перевіркою student assignment template має такий вигляд:

```

Зайдіть на віддалену систему, використовуючи наступні дані:
ім'я користувача {{login}}
пароль користувача {{password}}
host {{IP}}

Знайдіть файл з іменем {{file_name}} та введіть токен з цього файлу в поле відповіді:

```

Рис. 11. Вигляд student assignment template в режимі напівавтоматичної перевірки

Джерело: розроблено авторами.

При отриманні запиту від студента на виконання завдання на основі цього шаблону модуль генерації завдань створить унікальне параметризоване завдання виду:

```

Зайдіть на віддалену систему, використовуючи наступні дані:
ім'я користувача d745
пароль користувача vfby62-fds
host 172.18.0.22

Створіть директорію з іменем JHvbdk38d та введіть токен з цього файлу в поле відповіді:

```

Рис. 12. Вигляд параметризованого завдання студентові в режимі напівавтоматичної перевірки

Джерело: розроблено авторами.

Для реалізації такої схеми роботи достатньо розгорнути персональне середовище для студента та очікувати від нього результатів. При отриманні результату виконання завдання від студента при перевірці напівавтоматичного типу завдання модуль видає студенту фідбек, наприклад, інформацію про правильність виконання, та сповіщає модуль розгортання про можливість вимкнення конкретного навчального середовища.

Пілотний проєкт був запущений у межах дисципліни «Операційні системи Unix». Подальше впровадження цієї інформаційної технології в освітню діяльність передбачає:

- визначення відповідальної особи;
- визначення кола дисциплін і викладачів, які бажають впровадити технологію в освітній процес;
- проведення навчання користувачів у форматі навчального семінару для викладачів кафедри та розробку внутрішньої інструкції для користувачів;
- розробку банку шаблонів завдань (створення бібліотеки шаблонів завдань для різних тем та дисциплін);
- налаштування інтеграції системи з LMS, що використовується на кафедрі;
- інтеграцію із корпоративними засобами комунікації;
- підготовку інфраструктури для розгортання навчальних середовищ: визначення бекендів навчальних середовищ, обрахунок їх кількості і виділення необхідних ресурсів для розгортання;
- моніторингу стабільності системи (відповідальна особа відстежує навантаження на сервери, контролює наявність активних середовищ, проводить оновлення системи);
- організацію роботи із захисту персональної інформації;
- організацію регулярного резервного копіювання навчальних середовищ і результатів;
- придбання необхідного периферійного обладнання, наприклад, вебкамер,
- облаштування hardware-лабораторій;
- створення міжвикладацької ініціативної групи для адаптації системи до інших курсів кафедри, для обговорення можливих недоліків системи і її покращення;
- оцінку результатів і масштабування;
- адміністративні кроки, в тому числі формалізація в навчальному процесі (включити використання системи в робочі програми навчальних дисциплін);
- позиціонування системи як інноваційного проєкту кафедри - презентувати систему на конференціях, днях відкритих дверей, виставках EdTech.

Висновки. Проведений аналіз наукової бази і існуючих рішень показав, що одним із перспективних напрямів вирішення проблеми академічної недоброочесності при виконанні практичних лабораторних робіт є використання унікальних завдань. Головним недоліком впровадження таких завдань було і залишається неосяжне навантаження на викладачів, обумовлене необхідністю ручного створення та перевірки великої кількості унікальних варіантів, що зумовлює актуальність автоматизації цього процесу.

В рамках роботи було досліджено поточний стан використання персональних (варіативних або параметризованих) завдань на інженерних кафедрах НУ "Чернігівська Політехніка". У результаті досліджень сформульовано та вирішено актуальне наукове завдання щодо створення інформаційної технології, яка описує процеси автоматизованої генерації унікальних (параметризованих) практичних завдань, автоматичного розгортання індивідуальних навчальних середовищ для виконання цих завдань та їх подальшої автоматичної перевірки. Була обґрунтована необхідність розробки системи, направленої на автоматизацію освітніх процесів, а разом з тим - на зменшення навантаження на викладачів, зменшення кількості випадків списування та підвищення якості навчання. Також у рамках роботи безпосередньо розроблена система автоматизованої генерації та перевірки завдань та її архітектура.

Викладені в статті наукові результати мають безпосереднє практичне значення. Описана система дозволить вирішити проблему із видачею студентам унікальних (параметризованих) практичних завдань. Завдяки автоматизації ця система стане вигідним і зручним інструментом для навчання студентів інженерних спеціальностей. Для впровадження і використання даної системи в діяльність кафедри були сформовані рекомендації по впровадженню.

Розроблена система — реалістична, інноваційна, добре структурована, з високим потенціалом для трансформації освітнього процесу на кафедрі. Її впровадження вимагає поступової реалізації у 4 фазах: підготовка інфраструктури, навчання викладачів та студентів, оцінка і аналіз результатів впровадження, масштабування на інші дисципліни/кафедри.

Подальші перспективи досліджень полягають в розширенні переліку дисциплін, щодо яких можливе використання розробленої інформаційної технології та системи, інтеграції з іншими LMS-системами та генеративним ШІ для створення шаблонів, підтримці більшої кількості бекендів, а також покращенні системи так, аби початкові параметри враховували навчальні результати або рівень підготовки студента.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у 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 та взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Stevens, R., Silver, L., Richards, R., & Campbell, K. (2022). A comparison of faculty and student perspectives of academic integrity in an online environment: A pilot study. *Journal of Business Administration*. Online, 16(2), 1–13. <https://www.atu.edu/business/jbao/fall2022/202202%2002%20Stevens%20Silver%20Richards%20Campbell.pdf>
2. Valizadeh, M. (2022). Cheating in Online Learning Programs: Learners' Perceptions and Solutions. *Turkish. Online Journal of Distance Education*, 23(1), 195–209. <https://doi.org/10.17718/tojde.1050394>.
3. Naidu, K., & Sevnarayan, K. (2023). ChatGPT: An ever-increasing encroachment of artificial intelligence in online assessment in distance education. *Online Journal of Communication and Media Technologies*, 13(1), e202336. <https://doi.org/10.30935/ojcm/13291>.
4. Malik, A. A., Hassan, M., Rizwan, M., Mushtaque, I., Lak, T. A., & Hussain, M. (2023). Impact of academic cheating and perceived online learning effectiveness on academic performance during the COVID-19 pandemic among Pakistani students. *Frontiers in Psychology*, 14, 1124095. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1124095>.
5. Arnò, S., Galassi, A., Tommasi, M., Saggino, A., & Vittorini, P. (2021). State-of-the-Art of commercial proctoring systems and their use in academic online exams. *International Journal of Distance Education Technologies*, 19(2), 55–76. <https://doi.org/10.4018/ijdet.20210401.0a3>.
6. AI Proctoring System Official Site. <https://ai-proctor.com>.
7. Simon. (2017). Designing programming assignments to reduce the likelihood of cheating. *У The nineteenth australasian computing education conference*. ACM Press. <https://doi.org/10.1145/3013499.3013507>.
8. Agudo, I., Rios, R. & Nieto, A. (2019). Personalized computer security tasks with automatic evaluation and feedback. *Proceedings of the 2019 AIS SIGED International Conference on Information Systems Education and Research*. <https://aisel.aisnet.org/siged2019/1>.
9. Vykopal, J. Švábenský, V., Seda, P. & Čeleda, P. (2022). Preventing Cheating in Hands-on Lab Assignments. In *Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education - Volume 1 (SIGCSE 2022), Vol. 1*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 78–84. <https://doi.org/10.1145/3478431.3499420>.

10. Chan, J., & Teng, S. (2024). The Design and Implementation of PAGE: Personalised Assessment Generative Engine. *Pacific Journal of Technology Enhanced Learning*, 6(2), 33-46. <https://doi.org/10.24135/pjtel.v6i2.203>.
11. Zampirolli, F. D. A., Pisani, P. H., Josko, J. M., Kobayashi, G., Fraga, F., Goya, D., & Savegnago, H. R. (2020). Parameterized and automated assessment on an introductory programming course. In *Simpósio brasileiro de informática na educação*. Sociedade Brasileira de Computação. <https://doi.org/10.5753/cbie.sbie.2020.1573>.
12. Logacheva, E., Hellas, A., Prather, J., Sarsa, S., & Leinonen, J. (2024). Evaluating contextually personalized programming exercises created with generative AI. In *ICER 2024: ACM conference on international computing education research* (95–113). ACM. <https://doi.org/10.1145/3632620.3671103>.

References

1. Stevens, R., Silver, L., Richards, R., & Campbell, K. (2022). A comparison of faculty and student perspectives of academic integrity in an online environment: A pilot study. *Journal of Business Administration*, 16(2), 1–13. <https://www.atu.edu/business/jbao/fall2022/202202%2002%20Stevens%20Silver%20Richards%20Campbell.pdf>.
2. Valizadeh, M. (2022). Cheating in Online Learning Programs: Learners' Perceptions and Solutions. Turkish. *Online Journal of Distance Education*, 23(1), 195–209. <https://doi.org/10.17718/tojde.1050394>.
3. Naidu, K., & Sevnarayan, K. (2023). ChatGPT: An ever-increasing encroachment of artificial intelligence in online assessment in distance education. *Online Journal of Communication and Media Technologies*, 13(1), e202336. <https://doi.org/10.30935/ojcm/13291>.
4. Malik, A. A., Hassan, M., Rizwan, M., Mushtaque, I., Lak, T. A., & Hussain, M. (2023). Impact of academic cheating and perceived online learning effectiveness on academic performance during the COVID-19 pandemic among Pakistani students. *Frontiers in Psychology*, 14, 1124095. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1124095>.
5. Arnò, Simone & Galassi, Alessandra & Tommasi, Marco & Saggino, Aristide & Vittorini, Pierpaolo. (2021). State-of-the-Art of Commercial Proctoring Systems and Their Use in Academic Online Exams. *International Journal of Distance Education Technologies*. <http://dx.doi.org/10.4018/IJDET.20210401.oa3>.
6. AI Proctoring System Official Site. <https://ai-proctor.com>.
7. Simon. 2017. Designing Programming Assignments to Reduce the Likelihood of Cheating. In *Proceedings of the Nineteenth Australasian Computing Education Conference (ACE '17)*. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 42–47. <https://doi.org/10.1145/3013499.3013507>.
8. Agudo, Isaac; Rios, Ruben; and Nieto, Ana, "PERSONALIZED COMPUTER SECURITY TASKS WITH AUTOMATIC EVALUATION AND FEEDBACK" (2019). *Proceedings of the 2019 AIS SIGED International Conference on Information Systems Education and Research*. <https://aisel.aisnet.org/siged2019/1>.
9. Jan Vykopal, Valdemar Švábenský, Pavel Seda, and Pavel Čeleda. 2022. Preventing Cheating in Hands-on Lab Assignments. In *Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education - Volume 1 (SIGCSE 2022)*, Vol. 1. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA, 78–84. <https://doi.org/10.1145/3478431.3499420>.
10. Chan, J., & Teng, S. (2024). The Design and Implementation of PAGE: Personalised Assessment Generative Engine. *Pacific Journal of Technology Enhanced Learning*, 6(2), 33-46. <https://doi.org/10.24135/pjtel.v6i2.203>.
11. Zampirolli, F. D. A., Pisani, P. H., Josko, J. M., Kobayashi, G., Fraga, F., Goya, D., & Savegnago, H. R. (2020). Parameterized and automated assessment on an introductory programming course. In *Simpósio brasileiro de informática na educação*. Sociedade Brasileira de Computação. <https://doi.org/10.5753/cbie.sbie.2020.1573>.
12. Logacheva, E., Hellas, A., Prather, J., Sarsa, S., & Leinonen, J. (2024). Evaluating contextually personalized programming exercises created with generative AI. In *ICER 2024: ACM conference on international computing education research* (95–113). ACM. <https://doi.org/10.1145/3632620.3671103>.

Отримано 27.05.2025

Andrii Khyzhniak¹, Olga Prila²

¹PhD 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>

²PhD, Associate Professor at Information and Computer Systems Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olga.prila1986@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-0884-6516>

DESIGNING A SYSTEM FOR AUTOMATED GENERATION AND AUTOMATED ASSESSMENT OF PARAMETERIZED PRACTICAL ASSIGNMENTS

The article addresses the issue of ensuring academic integrity in the context of distance learning, particularly with regard to completion of practical assignments in engineering disciplines. The increasing incidence of unauthorized use of external resources, generative artificial intelligence, technical tools during online assessments, and identity substitution underscores urgent need for task individualization and automated monitoring of task completion. In response to these challenges, the authors propose the information technology and system for the automated generation of parameterized practical assignments (individualized for each student), with subsequent deployment of controlled and isolated learning environments and automatic result verification.

To define the system components, they were organized, and overall complexity was reduced through abstraction and separation of responsibilities, the system architecture was developed and the functional purpose of each module was described.

The architecture comprises five modules, namely: assignment generation, instructions verification module, personal learning environment deployment, automated assessment and result processing. Within the article, the specialized language Learning Task Definition Language (LTDL) that formalizes assignment templates, environment configuration instructions and evaluation criteria was introduced.

The conducted study demonstrates that manual preparation of personalized assignments imposes excessive time demands on instructors, whereas automation significantly reduces workload, enhances transparency of assessment, and mitigates cases of academic dishonesty. The system integrates with the Moodle learning management system and supports different backends: virtual machines, Docker containers, cloud platforms and JupiterLab.

The article also provides specific recommendations for implementing the system within the educational processes of technically oriented academic departments.

Keywords: parameterized practical assignments; automated generation; automated evaluation; automated assessment; distance learning ecosystem; virtual environment.

Fig.: 12. Table: 1. References: 12.

Владислав Дмитрович Байда¹, Олександр Анатолійович Велігорський²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

²кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри радіотехнічних та вбудованих систем

Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

МЕТОДОЛОГІЯ ДІАГНОСТИКИ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті запропоновано методологію діагностики апаратного забезпечення на основі цифрового двійника, що використовує векторне представлення вхідних та вихідних параметрів пристрою. Метод полягає в порівнянні векторів вимірювань значень з еталонними, отриманими з цифрового двійника, з подальшою якісною інтерпретацією відхилень за допомогою таблиць відповідності. Такий підхід забезпечує стійкість до шумів, не потребує додаткових сенсорів і може працювати в режимі реального часу.

Ключові слова: цифровий двійник; інформаційна технологія; вектори; діагностика; апаратне забезпечення; методологія; таблиця відповідності.

Рис.: 7. Табл.: 3. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. У сучасному світі електроніка широко використовується у критичних застосуваннях – від енергетики і транспорту до промисловості та фінансових інформаційних систем. У цих сферах надзвичайно важливо забезпечити високу надійність і безперебійну роботу електронних систем протягом усього життєвого циклу [1]. Вихід із ладу силових перетворювачів чи компонентів цифрових систем може призводити до значних простоїв, фінансових втрат і навіть ризиків для життя людини. Для прикладу, вітроенергетика та авіоніка вимагають практично нульового рівня відмов, що ставить жорсткі вимоги до надійності електроніки [1]. Водночас багато елементів (конденсатори, друковані плати, напівпровідникові прилади тощо) мають обмежений ресурс і схильні до деградації: дослідження показують, що близько 30 % відмов у силових перетворювачах спричинені конденсаторами, ще ~36 % – несправностями плат і з'єднувачів, а решта – це відмови напівпровідникових приладів та пайки [1]. Така статистика вказує на необхідність постійного моніторингу стану компонентів для завчасного виявлення ознак старіння або пошкоджень, щоб запобігти раптовим збоям.

Відповідно, останнім часом у світі значно зросла увага до діагностики (diagnosis), прогнозування (prognosis) та моніторингу стану (condition monitoring) [2] компонентів електроніки з метою запобігання відмовам та некоректній поведінці. Дослідження, опубліковані останніми роками, пропонують численні методи моніторингу стану, наприклад: вимірювання параметрів працездатності (спад напруги на відкритому переході транзистора, ESR конденсатора тощо), впровадження додаткових сенсорів, аналіз віброакустичних сигналів [1], алгоритми глибокого навчання [3]. Такі підходи здатні оцінювати “стан здоров'я”, або параметри працездатності (State of Health) силових модулів і дозволяють планувати технічне обслуговування за станом, у випадку збільшення імовірності потенційної відмови, уникаючи таким чином аварійних простоїв.

Цифрові двійники (Digital Twins) сьогодні розглядаються як перспективне рішення для моніторингу стану електронних пристроїв у реальному часі. Цифровий двійник – це цифрова копія або віртуальна модель фізичної системи, що безперервно отримує дані від реального об'єкта [4-6]. Завдяки сучасним технологіям Інтернету речей (IoT), такі моделі

можуть відображати поточний стан двійника в режимі онлайн і оцінювати його стан здоров'я. Це відкриває можливість переходу від планового або реакційного технічного обслуговування до обслуговування за станом, коли рішення про ремонт чи заміну приймаються на основі фактичного технічного стану пристрою.

Впровадження цифрових двійників здатне знизити ризик раптових відмов та оптимізувати витрати на обслуговування за рахунок точнішого прогнозування [6] і діагностики стану електронних систем.

Постановка проблеми. Попри успіхи в цій галузі, певні проблеми залишаються відкритим. По-перше, багато відомих методів моніторингу є інтрузивними або дорогими. Для досягнення високої точності вони часто потребують додаткових сенсорів чи тестових схем або навіть втручання в роботу самого пристрою [1]. Особливо це помітно в підходах, що працюють на рівні окремих електронних компонентів, а не цілої системи [4]. Це підвищує вартість, а втручання у пристрій може бути непрактичним у реальних умовах, особливо в брудних чи вологих середовищах, де розгерметизація компонента недопустима. У результаті, технічному персоналу часто бракує повної інформації про поточний технічний стан пристрою під час експлуатації [7]. Наприклад, існуючі методи контролю стану конденсаторів або потребують додаткового обладнання, або дають занадто низьку точність, що ускладнює їх впровадження в промисловості [8]. Обслуговування здійснюється або періодично за напружаним часом, або після того, як вже сталася відмова. Такий підхід не дозволяє завчасно виявити деградацію, що накопичується, наприклад, поступове висихання електролітичного конденсатора чи термомеханічну втому пайки, доки компонент не вийде з ладу. Як наслідок, відмови трапляються непередбачено, тому превентивне детектування деградації пристрою до моменту катастрофічної відмови є необхідним заходом.

По-друге, діагностика несправностей в режимі реального часу залишається викликом. Наприклад, силові перетворювачі працюють на високих частотах комутації, тож щоб виявляти деградацію компонентів за їхніми робочими сигналами, потрібні високоточні моделі і швидке вимірювання. Виконати моделювання в режимі реального часу з потрібною роздільною здатністю часового кроку буває важко через обмеження обчислювальних ресурсів [8].

По-третє, класичні засоби діагностики й захисту (датчики, періодичні огляди стану пристроїв технічним персоналом тощо) не в змозі повністю охопити складні фізичні процеси, що відбуваються в сучасних електронних системах. Електронний пристрій – це сукупність багатьох компонентів, що взаємодіють. Таким чином, нагрів елементів, механічні напруження, електричні перевантаження тощо можуть одночасно впливати на різні частини системи. Традиційний моніторинг (наприклад, контроль окремих параметрів – температури, струму, напруги) часто не виявляє прихованих ознак деградації або не дає цілісної картини про стан системи [1].

Ці проблеми пов'язані з апаратними обмеженнями, бо для повного моніторингу потрібно було б вбудувати у пристрій багато додаткових датчиків (наприклад, датчики напруги на кожному компоненті тощо), що збільшує складність, розміри й вартість системи. Також датчики потребують калібрування та можуть самі по собі поводитися некоректно. Таким чином, актуальним є завдання підвищення рівня моніторингу стану електронних систем без надмірного ускладнення апаратного забезпечення. Цифровий двійник здатний діяти як “віртуальний датчик”: він працює паралельно з реальним пристроєм та на основі доступних вимірювань моделює ті величини і процеси, які не вимірюються безпосередньо [8]. Таким чином, цифрові двійники вирішують проблему браку інформації про поточний стан кожного з компонентів пристрою і дозволяють виявляти відхилення до того, як вони спричинять відмову. Це надає можливість своєчасної діагностики й поладження системи, підвищуючи її надійність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що інтенсивні дослідження в цій галузі розпочалися протягом останнього десятиліття, і кількість наукових праць активно росла з кожним роком [6].

Для розв'язання вказаних проблем перспективним підходом є використання цифрових двійників, що дозволяє реалізувати моніторинг в реальному часі з гнучким масштабуванням складності й точності моделей залежно від вимог конкретних задач. Це забезпечує баланс між обчислювальною швидкістю, точністю діагностики та вартістю реалізації, що особливо важливо для застосування в реальних промислових умовах [9].

Нині можна відзначити кілька напрямків розвитку цифрових двійників для моніторингу стану електроніки. Загалом підходи поділяються на моделі, засновані на фізичних принципах, алгоритмах штучного інтелекту та гібридні рішення, що поєднують обидва підходи [6]. Нижче наведено детальний опис цих підходів:

Моделі, що засновані на фізичних принципах. Цифровий двійник створюється у вигляді детальної математичної моделі пристрою, що відтворює реальні фізичні процеси (електричні, теплові, механічні) у часі. Наприклад, для силового перетворювача може бути використана еквівалентна схема, яка в режимі реального часу розраховує струми, напруги та температуру ключових компонентів, віддзеркалюючи фактичну роботу пристрою. Такі моделі можуть включати відомі механізми зношування. Наприклад, залежність параметрів від температури чи циклів навантаження, щоб оцінити деградацію елементів. Моделі можуть бути реалізовані як на основі виведених формул для конкретного електронного пристрою, як це зроблено в дослідженні [4], так і шляхом використання програмних інструментів для моделювання. У дослідженні [8] реалізовано віртуальну копію трифазного перетворювача на основі його схемної моделі, яка паралельно з реальним інвертором розраховує ключові вихідні сигнали. Це дозволило безперервно відстежувати стан компонента (LC-фільтра на виході) та оцінювати його деградацію за зміною параметрів моделі. Використовуючи алгоритми оптимізації (Particle Swarm Optimization та генетичний алгоритм) для калібрування параметрів цифрового двійника, автори досягли високої точності ідентифікації погіршення ємності конденсатора фільтра. Важливо, що такий моніторинг здійснювався онлайн і не потребував додаткових датчиків – цифровий двійник виступав джерелом даних про стан компонента. Перевагою фізичних моделей є їхня інтерпретованість – вони ґрунтуються на реальних фізичних явищах, тому можуть пояснити, чому відбувається та чи інша деградація. До недоліків належать висока складність створення точних моделей складних пристроїв і значні обчислювальні витрати при їх реальному застосуванні.

Моделі, що засновані на штучному інтелекті. Цей підхід полягає у створенні цифрового двійника як набору алгоритмів, що навчені на даних експлуатації пристрою. У цьому випадку детальне фізичне моделювання може бути замінене або доповнене методами машинного навчання, які виявляють приховані закономірності в поведінці системи за історичними даними. Іншими словами, даний підхід можна назвати data-driven [6]. Наприклад, нейронна мережа або інший ML-алгоритм може передбачати наближення відмови компонента, аналізуючи тренди виміряних сигналів (струмів, температур, часу перемикання транзисторів тощо) [5]. В електроніці прикладами можуть бути системи діагностики, що на основі даних виявляють характерні ознаки наближення відмов (наприклад, збільшення амплітуди пульсації напруги як наслідок деградації конденсатора). Перевага data-driven підходу – здатність обробляти великий обсяг датчикових даних і знаходити складні залежності, не потребуючи повного фізичного опису. Це особливо корисно, коли фізичні моделі невідомі або надто складні. Недоліком є залежність від якості і обсягу наявних даних: модель «чорної скриньки» може видавати неточні прогнози за умов, відмінних від тих, на яких її навчено, а також її важче інтерпретувати з погляду фізики процесів [6].

Гібридні підходи. Найсучаснішим трендом є комбінування фізичних моделей та моделей, що засновані на штучному інтелекті в межах одного цифрового двійника. Такий підхід також відомий як гібридне прогнозування стану (Hybrid Prognostic and Health Management, PHM) [10]. Ідея полягає в тому, щоб використовувати сильні сторони обох методів: фізична модель надає структурну та причинно-наслідкову основу, а штучний інтелект доповнює її, обробляючи реальні дані та компенсуючи неточності або невраховані фактори моделі. У новітніх публікаціях пропонуються архітектури цифрових двійників із двома гілками – модель деградації на основі фізики та модель, навчена на даних [11]. Таким чином, дослідники з Delft University запропонували узагальнену двогілкову модель цифрового двійника для мікроелектронних компонентів, яка чітко розділяє віртуальний простір на дві частини: перша гілка моделює процеси старіння (physics-of-degradation та physics-of-failure), а друга гілка – обробляє дані сенсорів і застосовує ШІ для виявлення аномалій та прогнозування залишкового ресурсу [11]. Такий підхід дозволяє одночасно врахувати відому фізику відмов і статистичні закономірності з експлуатації. Очікується, що гібридні методи підвищують точність оцінки стану і надійність прогнозу, порівняно з використанням лише одного підходу.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри досягнутий прогрес, багато важливих аспектів застосування цифрових двійників в електроніці залишається недостатньо вивченим або потребує подальших досліджень. По-перше, відсутні усталені стандарти та протоколи для інтеграції цифрових двійників в сфері моніторингу стану у реальні експлуатаційні умови [6]. Потрібна уніфікація форматів даних, інтерфейсів обміну інформацією між фізичним пристроєм і його цифровою копією, а також вирішення питань кібербезпеки при такому обміні [11].

По-друге, сама побудова цифрового двійника для складних електронних систем стикається з викликом забезпечення достатньо високого співвідношення точності до швидкодії. Детальні і мультифізичні моделі (що враховують, наприклад, електричні, теплові, механічні процеси та їх взаємодію, а також старіння матеріалів) є важкими для реалізації в режимі реального часу [11]. З іншого боку, спрощені моделі, придатні для швидкого виконання (Edge computing, тобто технологія обчислень “на краю мережі”), можуть втрачати точність і адекватність при нестандартних впливах [11]. Тому виникає потреба в створенні компактних моделей, які збалансують швидкодію і вірогідність результатів.

По-третє, залишається відкритим питання визначення критеріїв відмови і залишкового ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) у межах цифрового двійника. Щоб двійник не лише виявляв дефекти, а й передбачував та давав прогноз часу до відмови, необхідно точно знати граничні значення параметрів, при перевищенні яких слід вживати заходів [11]. В електроніці часто спостерігається одночасний вплив декількох механізмів деградації (наприклад, термічна втома й електроміграція можуть разом призводити до відмови мікросхеми). Наразі немає повного розуміння, як об’єднати вплив різних деградаційних факторів у рамках однієї моделі, щоб вона давала коректний прогноз залишкового ресурсу [11].

Іншими словами, одним із найважливіших напрямків розвитку цифрових двійників для діагностики та моніторингу стану електронних пристроїв є розробка методології, що дозволяє побудувати ефективні і водночас компактні моделі для швидкої та точної діагностики у реальному часі, що дозволить запускати ці моделі безпосередньо на стороні самого пристрою (Edge computing) на відміну від дорогих хмарних рішень [12]. До того ж така методологія має бути уніфікована й мати змогу відстежувати процес деградації пристрою. Більшість наявних рішень базуються або на дуже складних фізичних моделях, що потребують значних обчислювальних ресурсів, або на алгоритмах машинного навчання, які, своєю чергою, вимагають великої кількості історичних даних і складних про-

цедур навчання. Це створює виклик, який вимагає знайти баланс між точністю діагностики, швидкістю та простотою практичного застосування, особливо для електронних пристроїв з обмеженими обчислювальними ресурсами чи обмеженим доступом до даних у реальному часі.

Метою статті є розробка методології діагностики технічного стану електронних пристроїв на основі інформаційної технології цифрових двійників, яка дозволяє підвищити точність, швидкість і надійність моніторингу стану апаратного забезпечення за рахунок використання якісних таблиць відповідності та якісної оцінки параметрів, забезпечуючи при цьому високу практичність реалізації і простоту використання. Ця методологія зможе використовувати лише значення, отримані на виходах пристрою, без необхідності вимірювання відповідних значень кожного компоненту окремо, при цьому діагностуючи проблему в конкретному компоненті, а не тільки в поведінці пристрою загалом.

Виклад основного матеріалу. Методологія базується на тому, що електричні схеми можна представити у вигляді моделі, що кожному вектору вхідних значень $\bar{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, де n – це довжина вхідного вектора, ставить у відповідність вектор вихідних значень $\bar{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, де m – це довжина вектора $\bar{Y}$, причому зміна принаймні одного з компонентів вхідного вектора вплине на принаймні один компонент вихідного вектора.

Вхідними значеннями x_i являються як фізичні величини, що подаються на схему ззовні (вхідна напруга перетворювача напруг тощо), так і властивості самої схеми (опори фіксованих резисторів, опори діодів тощо). В ідеалі вектор $\bar{X}$ має покривати всі можливі значення, що мають вплив на поведінку схеми. Для практичного застосування це не завжди є можливим чи доцільним з погляду балансу між точністю діагностики та простотою реалізації. Наявність властивостей самої схеми серед компонентів вектора $\bar{X}$ додає можливість детектувати помилки в номіналах, або ж граничні умови (обриви та короткі замикання) відповідних елементів схеми.

Таким чином, вихідний вектор $\bar{Y}$ можна представити точкою у m -мірній системі координат. Для спрощення малюнків надалі приймемо $m = 2$, оскільки двомірний простір простий для розуміння і візуалізації.

Умова нерівності вхідних векторів $\bar{X}_{DT}$ і $\bar{X}_{meas}$ має вигляд: $\bar{X}_{DT} \neq \bar{X}_{meas} \Leftrightarrow \exists i \in \{1, 2, \dots, n\}, x_{DT,i} \neq x_{meas,i}$. Тобто вхідні вектори є рівними тоді й тільки тоді, коли кожні відповідні компоненти даних векторів є рівними.

На рис. 1 зображено вектори $\bar{Y}_{DT}$ та $\bar{Y}_{meas}$ у двомірному просторі (як було зазначено вище, розглядаємо $m = 2$), а також їх різницю $\bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT}$. Оскільки ці вектори не є рівними, на рисунку вони зображені як такі, що мають різні координати. Це викликано тим, що вхідні вектори $\bar{X}_{DT}$ та $\bar{X}_{meas}$ також не є рівними. Оскільки математична модель ідеального електричного пристрою є детермінованою, тобто при однакових $\bar{X}$ модель генерує однакові $\bar{Y}$, то різниця вхідних векторів $\Delta\bar{X}_{meas,DT} = \bar{X}_{meas} - \bar{X}_{DT} = [x_{meas,1} - x_{DT,1}, x_{meas,2} - x_{DT,2}, \dots, x_{meas,n} - x_{DT,n}]$ має детермінований вплив на різницю вихідних векторів $\Delta\bar{Y}_{meas,DT} = \bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT} = [y_{meas,1} - y_{DT,1}, y_{meas,2} - y_{DT,2}, \dots, y_{meas,m} - y_{DT,m}]$.

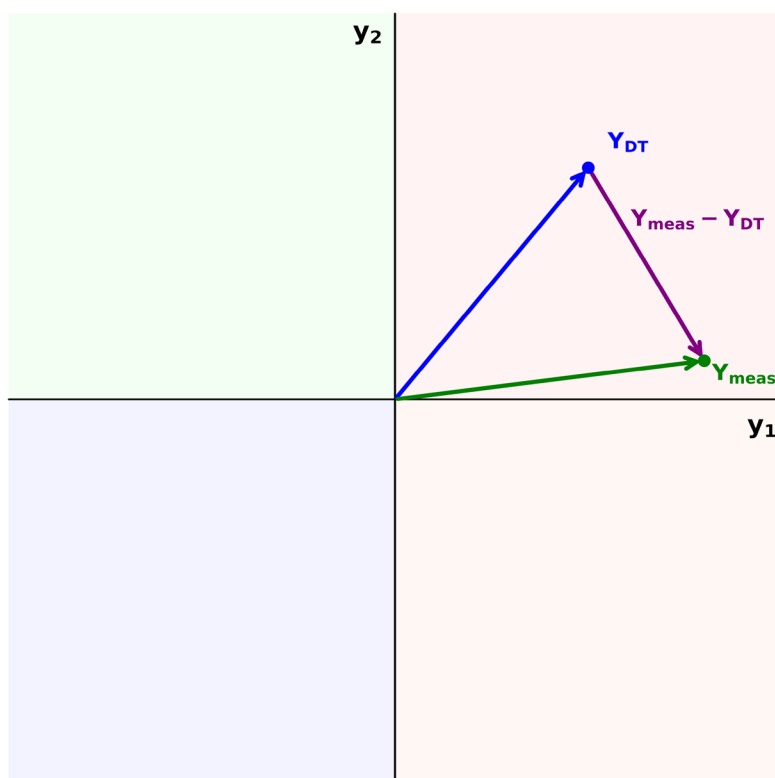


Рис. 1. Зображення двох різних векторів та їх різниці у двовірному просторі
Джерело: розроблено авторами.

Уявимо, що маємо дві пари векторів: $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT}), (\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$, причому $\bar{X}_{DT} \neq \bar{X}_{meas} \Rightarrow \bar{Y}_{DT} \neq \bar{Y}_{meas}$.

Таким чином, при умовах володіння таблицею відповідності $\Delta \bar{Y}$ до $\Delta \bar{X}$, для будь-якої заданої $\Delta \bar{Y}$, можливо отримати відповідну $\Delta \bar{X}$, до цього ж отримуючи інформацію по кожному x_i окремо.

Іншими словами, за наявності описаної вище таблиці (або ж дерева рішень) та пари векторів $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT}), (\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$, де $(\bar{X}_{DT}, \bar{Y}_{DT})$ формуються зі значень, отриманих з цифрового двійника (“DT” означає Digital Twin) пристрою, що досліджується, а $(\bar{X}_{meas}, \bar{Y}_{meas})$ – з реально поданих на вхід та заміряних з виходу фізичних значень (“meas” означає measured), можливо визначити, чим саме обумовлена $\Delta \bar{Y}_{meas,DT}$ і цим самим діагностувати проблему в апаратному забезпеченні. Це створює актуальність задачі формування такої таблиці для конкретного електронного пристрою.

Для спрощення подальших розрахунків треба нормалізувати вектор різниці векторів $\bar{Y}_{meas}$ та $\bar{Y}_{DT}$ так, що нормалізований вектор має такий вигляд: $\Delta \tilde{Y}_{ij} = (\bar{Y}_i - \bar{Y}_j) \oslash Y_j$, де $i \neq j$, а $\oslash$ це операція ділення Адамара (поелементне ділення векторів). Така нормалізація дозволяє уніфікувати систему координат і виражати кожен компонент нормалізованого вектора як відношення відповідних компонентів заданих векторів. Відповідні компоненти вектора $\Delta \tilde{Y}_{ij}$ позначаються як $\tilde{y}_k$.

Якщо нормалізувати $\Delta \bar{Y}_{meas,DT}$, то отримаємо $\Delta \tilde{Y}_{meas,DT}$, й перенісши початок вектора $\Delta \tilde{Y}_{meas,DT}$ на початок координат, отримаємо представлення, показане на рис. 2.

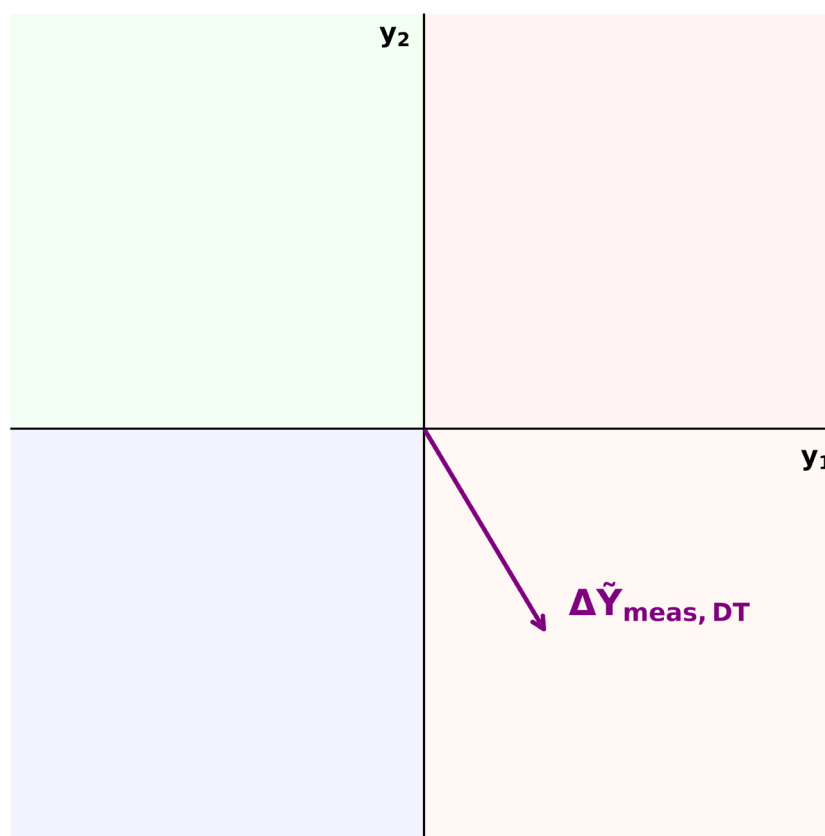


Рис. 2. Зображення нормалізованої різниці векторів у двомірному просторі
Джерело: розроблено авторами.

З рис. 2 видно, що, крім норми вектора $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$, можливо визначити й напрямок цього вектора (а отже, і напрямок відхилення $\bar{Y}_{meas}$ від $\bar{Y}_{DT}$) у просторі. Важливо зазначити, що відносна нормалізація не має впливу на напрямок вектора. Ігноруючи значення норми, ми можемо звести задачу формування таблиці відповідності, що була згадана вище, до таблиці відповідності напрямку вектора різниці вихідних значень до напрямку вектора різниці вхідних значень.

У двомірному просторі (як показано на рис. 3), нормалізований вектор різниці між значеннями з реального пристрою та значеннями, отриманими з математичної моделі, може відхилятися в один із чотирьох квадрантів (вектори $\Delta\tilde{Y}_{meas1,DT}$, $\Delta\tilde{Y}_{meas2,DT}$, $\Delta\tilde{Y}_{meas3,DT}$ і $\Delta\tilde{Y}_{meas4,DT}$). Окремої уваги потребує ситуація, коли один з векторів розташований на (або дуже близько до) одній з осей координат (як вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas5,DT}$), про що буде сказано пізніше. Таким чином, таблиця відповідності в ідеальному випадку має містити принаймні один рядок для кожного з квадрантів у випадку двомірного простору. У випадку k -мірного простору таких рядків, відповідно, має бути 2^k , по одному на кожен можливий напрямок (сектор) відхилення. У реальних задачах, як буде розглянуто пізніше, це не є завжди можливим і доцільним.

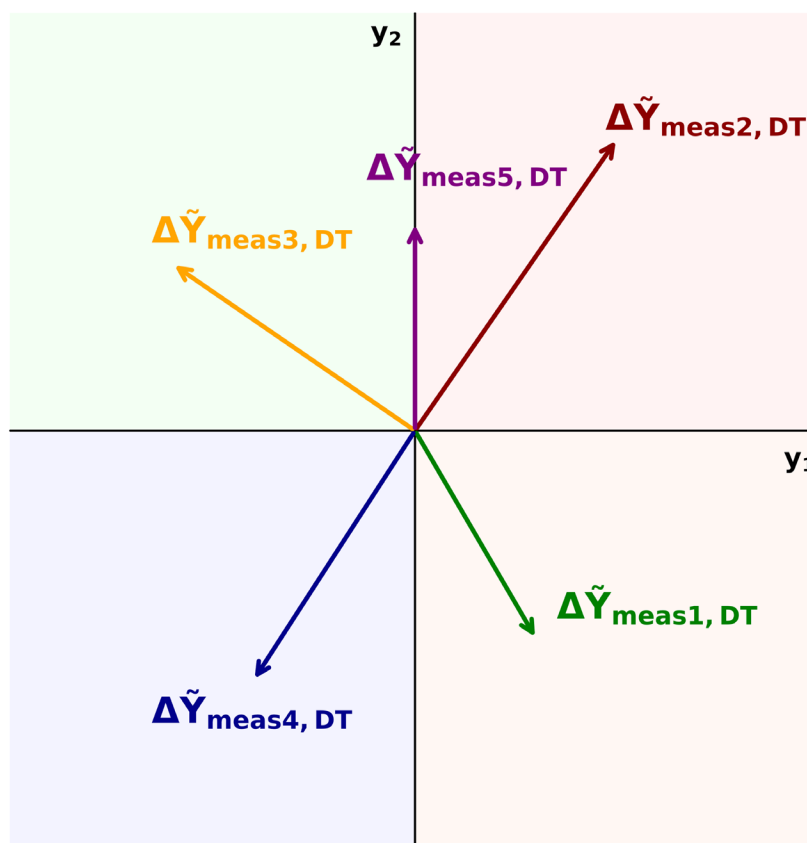


Рис. 3. Приклад декількох векторів, кожен з яких направлений в іншу сторону
Джерело: розроблено авторами.

Ігнорування значення відстані (норми вектора) дозволяє задати кожен рядок таблиці відповідності вектором $\bar{R} = [r_1, \dots, r_m]$, де m – це довжина вектора вихідних значень схеми $\bar{Y}$, а $r_i \in \{+, -\}$, де “+” означає, що в цьому секторі простору (квадранті у випадку $m = 2$, октанті у випадку $m = 3$ і т. д.) цей компонент вектора $\bar{Y}_{meas}$ (вимірів із реального пристрою) більше за відповідний компонент вектора $\bar{Y}_{DT}$; “-”, аналогічно, означає, що менше. Такий підхід знижує точність діагностики, оскільки ігнорує конкретні значення, проте значною мірою знижує складність формування таблиці відповідності та, як результат, практичної імплементації методології.

Отже, таблиця 1 має мати такий формат (у випадку $m = 2$):

Таблиця 1 – Шаблон таблиці відповідності при $m = 2$

Вектор $\bar{R}$	...
$[-,-]$	...
$[-,+]$	...
$[+,-]$	...
$[+,+]$	...

Джерело: розроблено авторами.

Методологія має на увазі порівняння реально вимірюваних виходів із виходами ідеальної математичної моделі. Це накладає свої обмеження на точність порівняння, оскільки, по-перше, неможливо створити математичну модель, що ідеально відповідає реальній через наявність паразитних параметрів і, по-друге, випадкові шуми вимірювань унеможливають точний збіг $\bar{Y}_{meas}$ та $\bar{Y}_{DT}$. Це призводить до необхідності створення “сірої зони” навколо

точки, що знаходиться на початку координат (оскільки початок вектора $\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}$ переноситься на початок координат). Одним зі способів формування сірої зони є створення відповідної гіперсфери у m -мірному просторі з центром у початку координат, що дозволить порівнювати встановлений радіус ρ цієї гіперсфери з відстанню $||\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}||$ так, що за умови $||\Delta\tilde{Y}_{meas,DT}|| \leq \rho$ поведінка пристрою, який відповідає вектору $\bar{Y}_{meas}$, вважається коректною (справною), як зображено на рис. 4. Проте такий підхід можна покращити, відмовившись від гіперсфери з радіусом ρ на користь порогових значень, які є унікальними для кожного компонента вихідного вектора, що буде показано в подальшому.

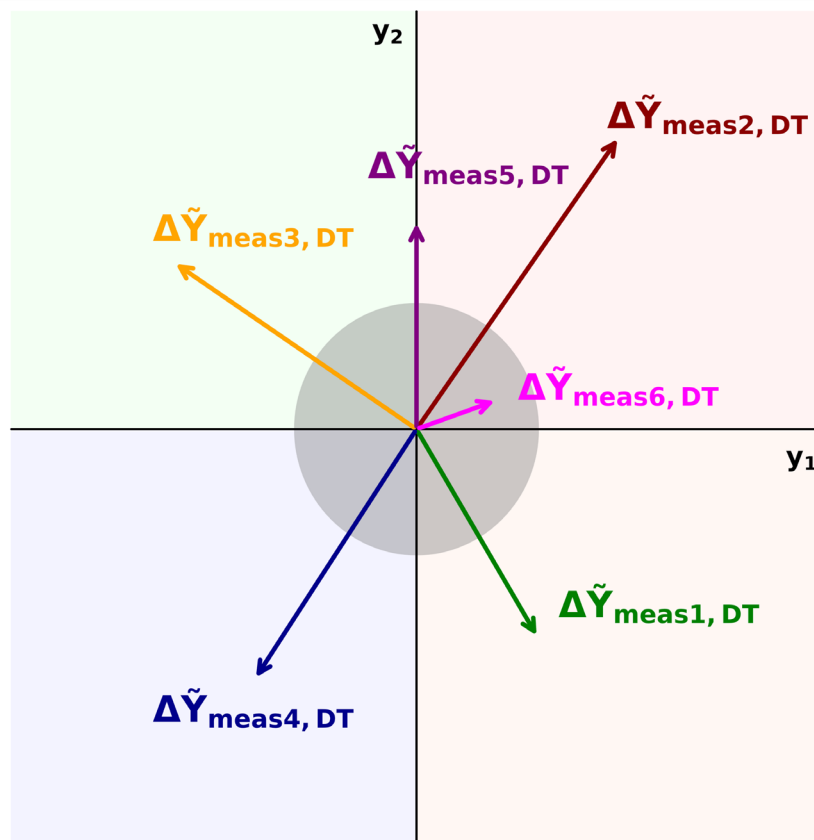


Рис. 4. Зображення сірої зони навколо початку координат

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 4 зображено вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas6,DT}$, який розташований у межах допустимого відхилення від початку координат. Іншими словами, можна сказати, що електронний пристрій, що діагностується, поводить себе коректно при заданих входах $\bar{X}_{meas6}$. У такому випадку, вочевидь, використання таблиці відповідності не є актуальним, оскільки таблиця потрібна для пошуку причини проблеми, а вектор $\bar{Y}_{meas6}$ не містить значення, які методологія вважає за ті, що символізують наявність проблеми.

Для практичного використання таблиці користувачу (людині, або програмному забезпеченню) потрібно визначити вектор $\bar{R}$ шляхом аналізу відхилення виходів реального обладнання від математичної моделі, і, при перевищенні порогового значення, шляхом пошуку по таблиці визначити причину несправності пристрою.

Описані вище перешкоди у порівнянні реальних значень з результатами математичної моделі також вносять свою складність у тому випадку, коли точка, що відображає реально виміряний з обладнання вектор, розташована близько до однієї з осей, як, напри-

клад, вектор $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$ на рис. 5. Дивлячись на цей вектор, який розташований у квадранті I, що відповідає вектору $\bar{R}_7 = [+ , +]$, можливо припустити, що через шуми вимірювань чи інші перешкоди, $\Delta\tilde{Y}_{meas7,DT}$ насправді (відкинувши шуми і неідеальності реального обладнання) може мати розташування, близьке до $\Delta\tilde{Y}_{meas8,DT}$ з відповідним вектором $\bar{R}_8 = [+ , -]$. Можливим розв'язком цієї проблеми є формування “сірої зони” також вздовж осей, як і зображено на рисунку 5. Відповідний r_i тоді слід позначити “0”, тобто в цьому випадку $\bar{R}_7 = \bar{R}_8 = [+ , 0]$. Значення ширини сірої зони для кожного вихідного значення може бути різним. Таким чином, ця характеристика має вигляд вектора $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]$, де m – довжина вихідного вектору, а θ_i означає ширину сірої зони i -го компонента відповідного вектора $\Delta\tilde{Y}$. Оскільки відповідний вектор $\Delta\tilde{Y}$ є нормалізованим, то порогове значення також виражається в нормалізованих одиницях (фактично відсотках), що виглядає таким чином: $r_i = 0 \Leftrightarrow |\tilde{y}_i| < \theta_i$. Порогові значення слід визначати, виходячи з конкретної практичної задачі. Для спрощення імплементації алгоритму можливо ввести загальне значення θ таке, що $\exists \theta \in R: \forall i \in \{1, \dots, m\}, \theta_i = \theta$. Іншими словами, θ слугує загальним значенням (однаковим для всіх компонентів), вираженим у нормалізованих одиницях (відсотках), яке задає ширину сірої зони.

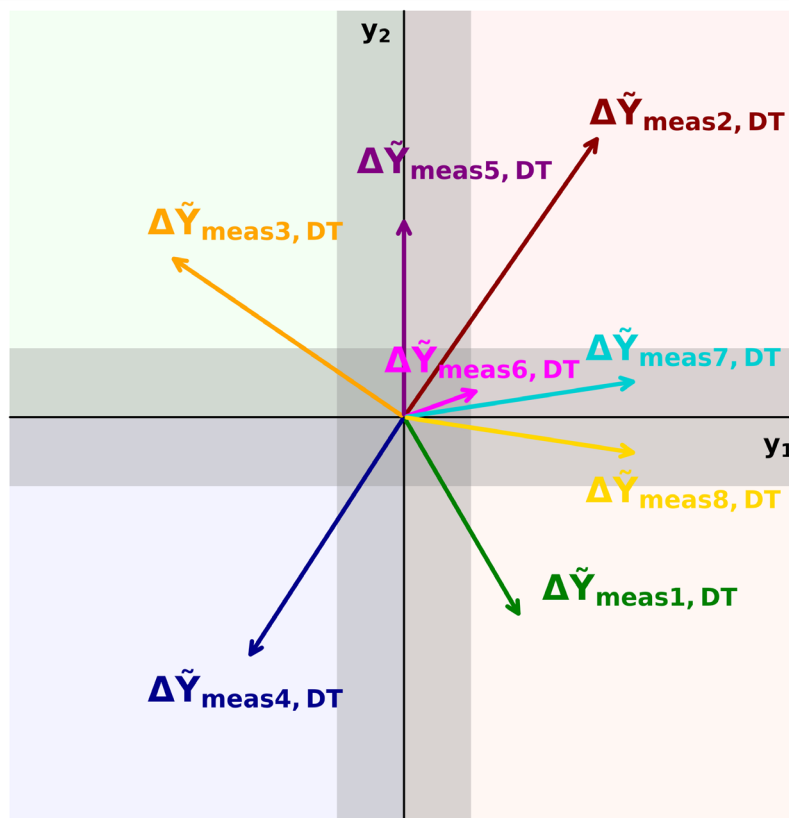


Рис. 5. Сіра зона вздовж осей координат

Джерело: розроблено авторами.

При спробі пошуку по таблиці відповідності, компоненти вектора $\bar{R}$, що мають значення “0” можна одночасно сприймати як “+” і як “-”, що, в результаті, збільшить кількість знайдених рядків в таблиці, а отже, і кількість потенційних причин виникнення некоректної поведінки обладнання. Таким чином, методологія стає більш стійкою до неточностей вимірювань (шумів і т. ін.).

У тій частині простору, де кожен компонент $\bar{R}$ має значення “0”, відхилення вихідного вектора є недостатньо сильними, щоб сигналізувати про некоректну поведінку пристрою. Таким чином, використання вектора $\bar{\theta}$ також дозволяє замінити описаний вище підхід з гіперсферою на унікальні порогові значення для кожного компонента вихідного вектора, що підвищує точність та конфігурованість алгоритму, оскільки дозволяє встановити різні порогові значення для різних фізичних величин.

Результат пошуку в таблиці має вказувати на конкретну причину (або набір можливих причин), що призвели до некоректної роботи електронного пристрою. Оскільки вхідні вектори $\bar{X}_{DT}$ та $\bar{X}_{meas}$ складаються, в ідеальному випадку, з усіх факторів, що мають вплив на поведінку пристрою (як реального, так і моделі), то і, відповідно, причиною дефектності вихідного вектора $\bar{Y}_{meas}$ є відхилення вектора $\bar{X}_{meas}$ від вектора $\bar{X}_{DT}$ як мінімум в одній з пар компонентів векторів, що впливає з визначення нерівності векторів. Запропонована методологія розглядає лише одиничні дефекти (відхилення лише одного компонента вектора $\bar{X}_{meas}$ від відповідного компонента вектора $\bar{X}_{DT}$), але може бути розширена на їх комбінації, що підвищить точність діагностики в більш комплексних випадках.

Оскільки причиною конкретного напрямку відхилення вектора $\bar{Y}_{meas}$, а отже, і значення вектора $\bar{R}$, є відхилення одного або більше компонентів вектора $\bar{X}_{meas}$, то можна ввести поняття вектора $\bar{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$, де n це довжина вектора $\bar{X}_{meas}$, а $e_i \in \{-, 0, +\}$. Якщо збільшення значення конкретного компонента x_i слугує причиною відхилення вектора $\bar{Y}_{meas}$, то відповідний компонент вектора $\bar{E}$ приймає значення “+”, якщо зменшення, то “-”, якщо ж зміна компонента вектора $\bar{X}_{meas}$ майже не впливає (до межі, визначеною відповідним θ_i) на це конкретне відхилення вектора $\bar{Y}_{meas}$ – “0”.

Таким чином, можливим прикладом таблиці відповідності при $m = 2$, $n = 3$ може бути (табл. 2):

Таблиця 2 – Приклад таблиці відповідності вектора $\bar{E}$ до $\bar{R}$

Вектор $\bar{R}$	Вектор $\bar{E}$
$[-,-]$	$[0,+,+]$
$[-,+]$	$[+,0,0]$
$[+,-]$	$[0,0,-]$
$[+,+]$	$[-,0,+]$

Джерело: розроблено авторами.

Для прикладу розглянемо перший рядок таблиці, який у відповідність до вектора $\bar{R} = [-,-]$ ставить вектор $\bar{E} = [0,+,+]$. Цей рядок означає, що до помітної (більшої за порогове значення) зміни вихідних значень y_1 та y_2 в сторону зменшення призвело збільшення або x_2 , або x_3 .

Запропонований вище формат таблиці може бути достатньо ефективним і точним для багатьох електричних схем і його можна використовувати для реальних застосунків. Водночас він ігнорує той факт, що при різних кратностях зміни вхідних значень ($\times 10$, $\times 1e6$, $\times 1e12$) вплив на вихідне значення буде різним, як зображено на рис. 6.

На рис. 6 зображено приклад можливого впливу зміни компонента x_1 вхідного вектора $\bar{X}$ на компонент y_1 вихідного вектора $\bar{Y}$. По обох осях зображені множники зміни відповідних значень. Червона штрихована лінія зображує межу, до якої r_1 приймає значення “0”, а після якої – “-”, як було описано вище. Цей приклад показує, що залежно від кратності зміни вхідного значення, вплив на вихідне значення може бути різним.

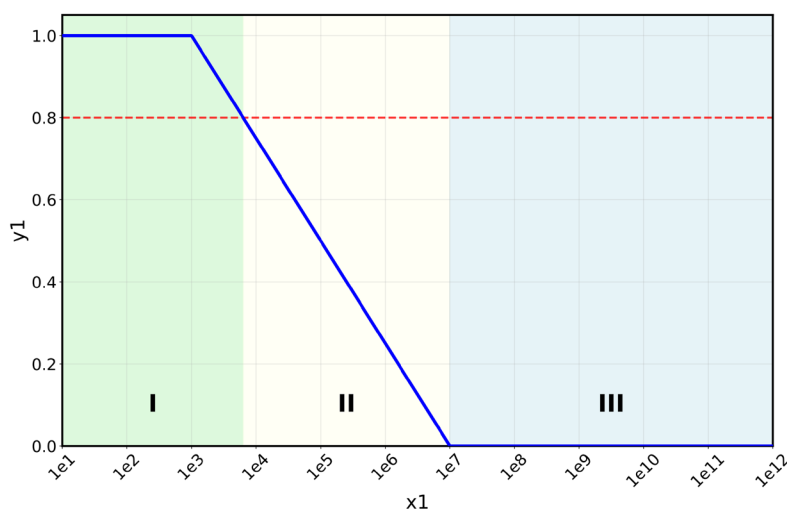


Рис. 6. Зображення різних зон значення x_1 , що впливає на значення y_1
Джерело: розроблено авторами.

Графік поділено на 3 зони:

I. Зона до моменту, коли множник y_1 спускається до відмітки 0.8, що слугує перехідним моментом для значення e_1 з "0" в "-". Це зона значень x_1 , які не впливають на r_1 (відповідно до y_1).

II. Зона, де множник y_1 знаходиться у проміжку (0.8; 0). Це є зона, яка відповідає $r_1 = \langle - \rangle$.

III. Зона, починаючи з якої значення y_1 стає "0". Ця зона також відповідає $r_1 = \langle - \rangle$, але вона може відмінний від зони II фізичний сенс. Наприклад, якщо x_1 це певний опір, а y_1 – напруга, то в зоні III настає момент, коли опір починає поводити себе як розрив на схемі.

Таким чином, для покращення точності діагностики, гарним рішенням є перетворення вектора $\bar{E}$ на вектор множинних станів. У такому випадку, $\bar{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n]$, $e_i \subseteq \{0\} \cup \{+k, -k | k \in N, 1 \leq k \leq K\}$, де n – довжина вхідного вектора $\bar{X}$, а K – ціле позитивне число, що задає максимальну кратність повторення знаків «+» або «-» («0» нема сенсу повторювати). Кількість повторення знаків відображає відносний ступінь зміни. У прикладі з рис. 6, $K = 2$ (тобто ми допускаємо максимум дві ступені зміни). Однак ця кількість може бути змінена за потреби.

Іншими словами, e_i – множина, що може включати такі елементи при $K=2$:

- 0 (відсутність значущого впливу)
- +, ++ (різний ступінь збільшення)
- -, -- (різний ступінь зменшення)

У випадку рисунка 6 зона I відповідає $e_1 = \{0\}$, зона II відповідає $e_1 = \{-\}$, а зона III – $e_1 = \{--\}$.

Таким чином, типовий приклад модифікованого вектора $\bar{E}$ в таблиці може мати вигляд $\bar{E} = [\{+, ++\}, \{0\}, \{-\}, \{--\}]$, де кожна множина e_i описує можливі ступені впливу відповідного компонента вхідного вектора $\bar{X}$ на відповідну зону відхилення вихідних параметрів пристрою.

Така зміна формату таблиці не є занадто критичною і дозволяє застосункам, що використовували попередній формат, досить легко розширити свій алгоритм за потреби збільшення точності діагностики.

Методи генерації таблиць відповідності.

Для практичного застосування запропонованої методології критично важливим є систематичний підхід до побудови таблиць відповідності. Пропонується три основні методи генерації таких таблиць, які можуть використовуватися окремо або в комбінації залежно від специфіки пристрою.

Метод систематичного моделювання

Цей метод передбачає введення контрольованих відхилень у параметри цифрового двійника з подальшим аналізом їх впливу на вихідні характеристики. Алгоритм цього методу має такий вигляд:

1. Визначення важливих параметрів: Визначення всіх компонентів вектора $\bar{X}$, які можуть зазнавати деградації (опори резисторів, ємності конденсаторів, параметри напівпровідникових приладів тощо).

2. Планування експериментів: Для кожного параметра x_i визначаються нормальні значення $x_{i,norm}$ і діапазони відхилень $[x_{i,min}, x_{i,max}]$.

3. Моделювання: Для кожного параметра x_i послідовно задаються значення від $x_{i,min}$ до $x_{i,max}$, розраховується відповідний вихідний вектор $\bar{Y}_{sim}$ і визначається нормалізований вектор відхилення $\Delta\bar{Y}_{sim,norm}$.

4. Побудова відповідей: На основі отриманих результатів будуються залежності напрямку відхилення $\bar{R}$ від характеру зміни параметрів $\bar{E}$.

Метод аналітичного виводу для простих схем

Для лінійних або слабко нелінійних схем можливе аналітичне визначення залежностей між вхідними параметрами та вихідними характеристиками. Цей підхід має такий алгоритм:

1. Аналітичне моделювання: Виведення математичних залежностей $\bar{Y} = f(\bar{X})$.

2. Лінеаризація: Для нелінійних залежностей використовується лінеаризація навколо робочої точки: $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta y_j}{\Delta x_i}$.

3. Визначення знаків впливу: На основі частинних похідних визначаються знаки впливу кожного параметра:

Якщо $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} > 0 \rightarrow$ збільшення x_i призводить до збільшення y_j .

Якщо $\frac{\partial y_j}{\partial x_i} < 0 \rightarrow$ збільшення x_i призводить до зменшення y_j .

4. Побудова відповідей: Комбінування знаків впливів формує рядки таблиці відповідності.

Метод формалізації експертних знань

Цей метод застосовується у випадках систем, де експертні знання про поведінку схеми можуть бути формалізовані у вигляді правил. Процес має такий вигляд:

1. Збір експертних знань: аналіз джерел, опитування фахівців із діагностики конкретного типу обладнання тощо.

2. Структурування знань: Перетворення якісних описів у формалізовані правила виду: "ЯКЩО [конкретна причина], ТО [конкретний дефект]".

3. Верифікація правил: Перевірка сформульованих правил на тестових випадках або історичних даних.

4. Побудова таблиці: Трансформація правил у формат векторів $\bar{R}$ та $\bar{E}$.

Гібридний підхід до генерації таблиць

На практиці рекомендується комбінувати описані методи:

1. Початкова генерація: Використання аналітичного виводу (для простих пристроїв) або систематичного моделювання (для складних).

2. Валідація: Перевірка отриманих правил за допомогою експертних знань.

3. Уточнення: Корекція таблиць на основі реальних експлуатаційних даних.

Результати дослідження.

Перевагами представленої методології є:

1. *Стійкість до неточностей вимірювання.* Абстрагування від конкретних числових значень робить метод менш чутливим до шумів вимірювань і випадкових відхилень. Знижає необхідність у високоточному вимірюванні параметрів, що є дуже актуальним у реальних умовах, де наявні шуми й неточності, фільтрація яких призводитиме до зменшення точності діагностики.

2. *Простота реалізації алгоритму.* Від алгоритму, що виконує діагностику або моніторинг стану вимагається лише виміряти (або задати фіксовані значення в налаштуваннях для параметрів самого пристрою) значення входів і виходів пристрою, подати відповідні значення на цифровий двійник, нормалізувати вектор різниці виходів реального пристрою і цифрового двійника, після чого порівняти кожен компонент цього вектора з його відповідною шириною сірої зони, чим отримати вектор R і зробити пошук по таблиці відповідності.

3. *Низькі вимоги до обчислювальних ресурсів.* Шляхом використання алгоритму на тих самих входних значеннях пристрою, можливо використати цифровий двійник лише один раз для кожного конкретного набору входних значень, а в подальшому використовувати результати цієї симуляції без повторної потреби в запуску самої симуляції. Усі інші дії алгоритму, що описані в пункті 2 переваг є простими математичними операціями, що дозволяє запускати алгоритм навіть на малопотужному обладнанні на кшталт одноплатних комп'ютерів чи навіть мікроконтролерів. До того ж таблиця відповідності є досить компактною, що не вимагає великих обсягів пам'яті для її збереження.

4. *Простота і зрозумілість інтерпретації.* Відносні позначення на кшталт "+", "++" або "-", "--" легко читаються людиною і дозволяють швидко зрозуміти характер впливу, не аналізуючи конкретні значення.

5. *Гнучкість у роботі з нелінійними залежностями.* Відносні позначення дозволяють враховувати нелінійність впливу параметрів, коли не завжди можливо підібрати конкретні порогові значення, які б чітко розмежовували різні сценарії. Наприклад, у випадку нелінійного пристрою чітке числове значення важко задати, але якісна оцінка ступеня зміни легко піддається визначенню.

Реалізація методології. Перед використанням методології необхідно виконати етап ініціалізації, який складається з таких кроків:

1. *Створення моделі цифрового двійника.* Розробка математичної моделі, тестування і валідація точності моделі у порівнянні з наявним справним пристроєм, визначення компонентів векторів $\bar{X}$ та $\bar{Y}$.

2. *Створення таблиці відповідності.* Використовуючи один із трьох запропонованих методів (систематичного моделювання, аналітичного виводу, формалізації експертних знань) або будь-який інший.

3. *Налаштування ширини сірої зони.* Визначення θ_i для кожного компонента окремо або ж визначення загального значення θ .

4. *Калібрування системи.* Тестування і валідація значень таблиця відповідності.

Використання цієї методології виконується шляхом періодичного (частота та умови залежать від конкретного застосування) запуску алгоритму, що отримує пари входного і вихідного векторів, визначає відповідний вектор $\bar{R}$, а далі аналізує їх за допомогою таблиці відповідності. Якщо з кожним наступним запуском алгоритму робити вимірювання зберігаючи такі ж самі значення входного вектора, то, зберігаючи отримані пари векторів, можна відстежувати дрейф вектора $\bar{Y}_{meas}$ в просторі, а отже, і швидкість та напрямок деградації поведінки електронного пристрою, що відкриває можливості для покращення методології в бік прогнозування часу до виникнення дефекту. Це відкриває можливість для подальшого розвитку методології, а саме розробки алгоритму відстежування змін поведінки пристрою і прогнозування відмови на основі характеру і швидкості даних змін.

Методологія використовує скалярні значення як компоненти входних і вихідних векторів. Використання векторних значень для детектування некоректної поведінки пристроїв також можливе, наприклад як RMS відхилення вихідного сигналу реального електронного пристрою від математичної моделі. Проте така метрика не може надати необхідного "напряму" відхилення, що не дозволить діагностувати, власне, причину некоректної поведінки.

На рис. 7 зображено блок-схему алгоритму реалізації методології в базовому вигляді, без врахування дрейфу $\bar{Y}_{meas}$:

Ініціалізація системи:

1. Створення моделі цифрового двійника
2. Генерація таблиці відповідності
3. Налаштування ширини сірої зони
4. Калібрування системи

Періодичний алгоритм:

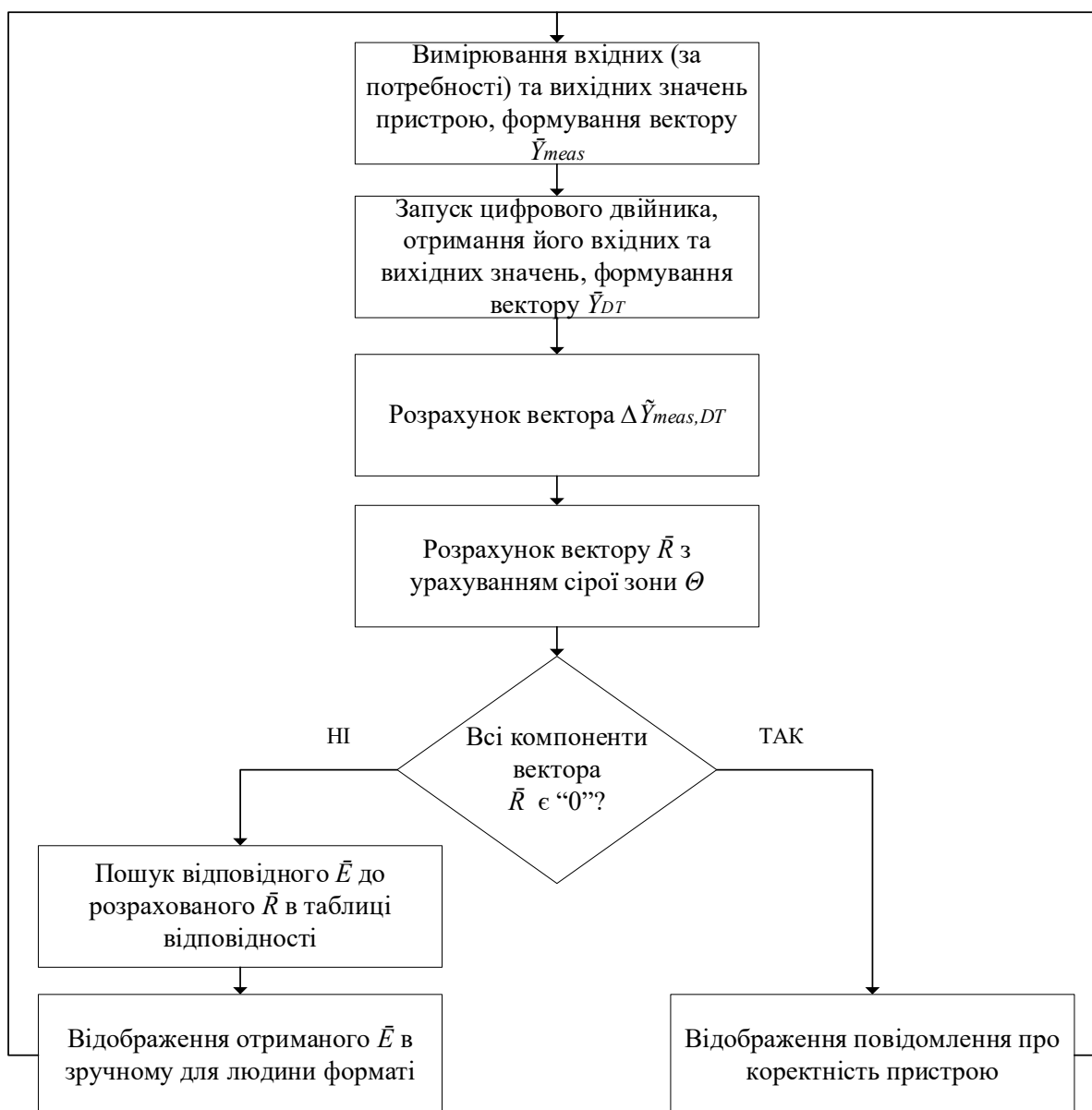


Рис. 7. Блок-схема реалізації методології

Джерело: розроблено авторами.

Приклад використання. Розглянемо приклад використання періодичного алгоритму даної методології для найпростішої електричної схеми – дільника напруги. Схема виглядає таким чином (рис. 8):

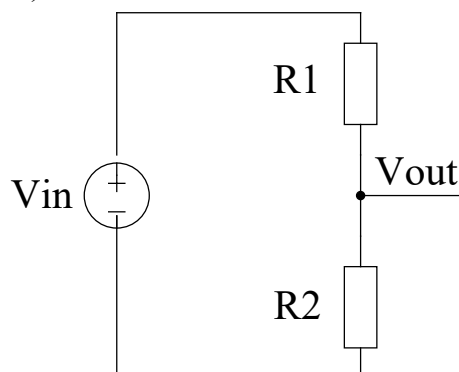


Рис. 8. Схема дільника напруги для прикладу використання методології
Джерело: розроблено авторами.

Схема складається з вхідного джерела напруги V_{in} та двох резисторів: $R1$ та $R2$.

Припустимо, що ширина сірої зони становить 5 %, а отже, $\bar{\theta} = [\theta_1, \theta_2] = [0,05, 0,05]$, а таблиця відповідності (табл. 3) вже визначена і має такий вигляд (вона відповідає дійсності для дільника напруги):

Таблиця 3 – Таблиця відповідності вектора $\bar{E}$ до $\bar{R}$ для прикладу з дільником напруги

Вектор $\bar{R}$	Вектор $\bar{E}$	Пояснення
[-,-]	[+,0,0]	Вхідна напруга підвищена
[-,+]	[0,0,-]	Значення $R2$ занижене
[+,-]	[-,0,0]	Вхідна напруга занижена
[+,+]	[0,-,0]	Значення $R1$ занижене

Джерело: розроблено авторами.

1. Визначимо вхідні та вихідні вектори цього пристрою. Входами системи є значення напруги V_{in} та опорів $R1$ та $R2$. Отже, вхідний вектор має вигляд $\bar{X} = [V_{in}, R1, R2]$. Виходами системи слугують напруга на виході V_{out} та струм через опори I . Отже, вихідний вектор має вигляд $\bar{Y} = [V_{out}, I]$, де $V_{out} = \frac{V_{in} \times R2}{R1 + R2}$, а $I = \frac{V_{in}}{R1 + R2}$.

2. Подамо на вхід цифрового двійника значення $\bar{X}_{DT} = [12\text{В}, 1000\Omega, 2000\Omega]$, отримуємо вихідні значення $\bar{Y}_{DT} = [8\text{В}, 4\text{мА}]$. Припустимо для прикладу, що вхідні значення реального пристрою мають вигляд $\bar{X}_{meas} = [12\text{В}, 1000\Omega, 1500\Omega]$, що, відповідно, означає наступні вихідні значення: $\bar{Y}_{meas} = [7.2\text{В}, 4.8\text{мА}]$.

3. Виразуємо нормалізований вектор різниці: $\Delta\bar{Y}_{meas,DT} = (\bar{Y}_{meas} - \bar{Y}_{DT}) \oslash Y_{DT} = [7.2 - 8, 4.8 - 4.0] \oslash [8, 4] = [-0.8\text{В}, 0.8\text{мА}] \oslash [8\text{В}, 4\text{мА}] = [-0.1, +0.2]$.

4. Застосуємо сіру зону

$$|\tilde{y}_1| = |-0.10| = 0.10 > \theta_1 = 0.05 \rightarrow r_1 = "-"$$

$$|\tilde{y}_2| = |0.20| = 0.20 > \theta_2 = 0.05 \rightarrow r_2 = "+"$$

Отже, результуючий вектор має вигляд $\bar{R} = [-, +]$. Пошук по таблиці відповідності (табл. 3) по заданому $\bar{R}$ вказує на причину $\bar{E} = [0, 0, -]$, що означає занижене значення $R2$, що, і є правильною причиною відхилення вихідних значень.

Порівняння з традиційною нечіткою логікою. Важливо зазначити, що запропонована методологія використовує дискретні стани ("+", "-", "0") з чіткими пороговими значеннями, що відрізняється від традиційної нечіткої логіки. На відміну від нечіткої логіки,

яка оперує функціями належності та ступенями істинності в діапазоні $[0,1]$, запропонований підхід використовує чітке розмежування станів за допомогою порогових значень. Таке рішення було прийнято для спрощення практичної реалізації та зменшення обчислювальних вимог, зберігаючи при цьому основну перевагу якісного підходу – стійкість до шумів вимірювань та простоту інтерпретації результатів.

Висновки. У наш час цифрових технологій важливим питанням є забезпечення надійності роботи електронних пристроїв різного роду. Важливо не тільки розробляти пристрої таким чином, щоб вони могли слугувати довго, а й мати змогу автоматично прогнозувати відмову окремих компонентів пристрою та діагностувати дефекти у вже працюючому обладнанні. Як показав аналіз існуючих публікацій, для цього напрямку широкого застосування набуває використання цифрового двійника як еталонної моделі системи, з поведінкою якого порівнюється поведінка реального пристрою.

У цій статті була запропонована методологія діагностики апаратного забезпечення, яка базується на представленні вхідних та вихідних значень пристрою у вигляді векторів і формування таблиць відповідності відхилення виходів пристрою від еталонних до можливих причин, що призвели до цього відхилення (дефекту). Еталонні значення отримуються за допомогою використання інформаційної технології цифрового двійника. Дана методологія використовує якісний підхід, що надає переваги щодо простоти реалізації та низьких вимог до обчислювальних ресурсів, а отже, і ціни реалізації, хоча це в деяких випадках може призводити до зниження точності. Методологія працює з вхідними та вихідними значеннями пристрою без потреби фактичного вимірювання кожного компоненту пристрою, при цьому дозволяючи проаналізувати вплив даних компонентів по окремоті.

Важливим внеском роботи є систематизація підходів до генерації таблиць відповідності, які є центральним елементом запропонованої методології. Запропоновано три методи: систематичне моделювання несправностей для повного покриття простору станів, аналітичний вивід для простих схем з відомими математичними залежностями, та формалізацію експертних знань для складних систем. Гібридне поєднання цих методів із можливістю автоматизації процесу генерації спрощує і покращує можливість практичної реалізації методології для широкого спектра електронних пристроїв.

Дана робота відкриває низку можливостей для подальших досліджень і покращень, а саме:

1. Відстежування зміни поведінки виходів пристрою відносно еталонних значень, отриманих з цифрового двійника, що дозволить прогнозувати час до відмови й завчасно реагувати на деградацію.
2. Розширення методології так, що вона враховуватиме не тільки поодинокі відхилення вхідних значень, а і їх комбінації.
3. Використання технології машинного навчання для формування таблиць відповідності на основі накопичених даних, що може значно підвищити масштабованість і точність діагностики.
4. Інтеграція методології у вбудовані системи моніторингу та технічного обслуговування з використанням технології кордонних обчислень (Edge computing) для забезпечення автономної роботи в реальному часі.

Запропонована методологія може використовуватися для різних застосувань, найбільш визначним з яких є силова електроніка, але підходить і для інших галузей, де пристрій можна представити у вигляді набору вхідних і вихідних значень, а також є можливість вимірювати ці вихідні значення. Завдяки поєднанню простоти, ефективності й можливості подальшого вдосконалення, представлений підхід має потенціал стати основою для широкого впровадження в системах діагностики та прогнозування технічного стану електронних пристроїв.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували:

1. Claude: для генерації коду мовою Python, який використовувався для генерації діаграм за допомогою бібліотеки PyChart.

2. ChatGPT з режимом пошуку мережею: для пошуку статей на схожу тематику у відкритих джерелах.

Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Susinni, G., Rizzo, S. A., & Iannuzzo, F. (2021). Two Decades of Condition Monitoring Methods for Power Devices. *Electronics*, 10(6), 683. <https://doi.org/10.3390/electronics10060683>.

2. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(11), 2734–2752. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2049377>.

3. Liu, Y., Sangwongwanich, A., Zhang, Y., Ou, S., & Wang, H. (2024). A transferable deep learning network for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase inverters. У 2024 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC). IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec48139.2024.10509151>.

4. Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2105–2118. <https://doi.org/10.1109/tpel.2020.3009600>.

5. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.

6. Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>.

7. Spro, O. C. (2020). *Digital twins: Condition-monitoring of power electronic converters*. SINTEF Energy Blog. <https://blog.sintef.com>.

8. Diz, S. d. L., López, R. M., Sánchez, F. J. R., Llerena, E. D., & Peña, E. J. B. (2023). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*, 334, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120606>.

9. Milton, M., De La O, C. A., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), 1–1.

10. Murgia, A., Harsha, C., Tsiporkova, E., Nawghane, C., & Vandeveld, B. (2024). A hybrid model for prognostic and health management of electronic devices. *Electronics*, 13(3), 642. <https://doi.org/10.3390/electronics13030642>.

11. Inamdar, A., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Digital twin technology—a review and its application model for prognostics and health management of microelectronics. *Electronics*, 13(16), 3255. <https://doi.org/10.3390/electronics13163255>.

12. Bhoi, S. K., Chakraborty, S., Verbrugge, B., Helsen, S., Robyns, S., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2024). Intelligent data-driven condition monitoring of power electronics systems using smart edge-cloud framework. *Internet of Things*, 26, 101158. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101158>.

References

1. Susinni, G., Rizzo, S. A., & Iannuzzo, F. (2021). Two Decades of Condition Monitoring Methods for Power Devices. *Electronics*, 10(6), 683. <https://doi.org/10.3390/electronics10060683>.

2. Yang, S., Xiang, D., Bryant, A., Mawby, P., Ran, L., & Tavner, P. (2010). Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(11), 2734–2752. <https://doi.org/10.1109/tpel.2010.2049377>.

3. Liu, Y., Sangwongwanich, A., Zhang, Y., Ou, S., & Wang, H. (2024). A transferable deep learning network for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase inverters. *У 2024 IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/apec48139.2024.10509151>.
4. Peng, Y., Zhao, S., & Wang, H. (2021). A digital twin based estimation method for health indicators of DC–DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(2), 2105–2118. <https://doi.org/10.1109/tpe.2020.3009600>.
5. Bofill, J., Abisado, M., Villaverde, J., & Sampedro, G. A. (2023). Exploring digital twin-based fault monitoring: Challenges and opportunities. *Sensors*, 23(16), 7087. <https://doi.org/10.3390/s23167087>.
6. Liu, H., Xia, M., Williams, D., Sun, J., & Yan, H. (2022). Digital twin-driven machine condition monitoring: A literature review. *Journal of Sensors*, 2022, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2022/6129995>.
7. Spro, O. C. (2020). *Digital twins: Condition-monitoring of power electronic converters*. SINTEF Energy Blog. <https://blog.sintef.com>.
8. Diz, S. d. L., López, R. M., Sánchez, F. J. R., Llerena, E. D., & Peña, E. J. B. (2023). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*, 334, 120606. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120606>.
9. Milton, M., De La O, C. A., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, PP(99), 1–1.
10. Murgia, A., Harsha, C., Tsiporkova, E., Nawghane, C., & Vandeveld, B. (2024). A hybrid model for prognostic and health management of electronic devices. *Electronics*, 13(3), 642. <https://doi.org/10.3390/electronics13030642>.
11. Inamdar, A., van Driel, W. D., & Zhang, G. (2024). Digital twin technology—a review and its application model for prognostics and health management of microelectronics. *Electronics*, 13(16), 3255. <https://doi.org/10.3390/electronics13163255>.
12. Bhoi, S. K., Chakraborty, S., Verbrugge, B., Helsen, S., Robyns, S., El Baghdadi, M., & Hegazy, O. (2024). Intelligent data-driven condition monitoring of power electronics systems using smart edge-cloud framework. *Internet of Things*, 26, 101158. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101158>.

Отримано 10.06.2025

UDC 004.942

Vladyslav Baida¹, Oleksandr Velihorskyi²

¹PhD Student of the Department of informational and computer systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: Vladyslav.Baida@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Embedded Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: o.veligorskiy@stu.cn.ua. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8256-7339>

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

METHODOLOGY FOR HARDWARE DIAGNOSTICS USING AN INFORMATION TECHNOLOGY OF DIGITAL TWIN

This paper presents a novel methodology for diagnosing hardware systems based on the use of the digital twin by using a vector-based representation of both input and output values. The method involves comparing the output vector of a real electronic device with a corresponding reference vector derived from a mathematical model (digital twin). Deviations between these vectors are analyzed using a specially designed table of discrete qualitative correspondences, which enables identification of the likely causes of incorrect behavior in specific components without requiring intrusive measurements or additional sensors.

The approach models the behavior of an electronic system as a transformation from an input vector to an output vector, where each deviation in input causes a deterministic change in output. This vector-based abstraction allows for the construction of decision rules and classification zones using relative relationships between components rather than absolute values, making the system robust to noise, parasitic effects, and measurement uncertainties. The proposed method is computationally efficient, allowing deployment on low-power embedded platforms, and does not rely on deep physical modeling or extensive machine learning training datasets.

The methodology introduces the concept of a “gray zone” in the multidimensional output space, where small deviations are treated as acceptable tolerances, and only significant directional changes trigger diagnostic logic. Additionally, a normalization step and the introduction of threshold vectors allow for scalable precision and adaptation to non-linear dependencies in hardware behavior.

Advantages of this approach include simplicity of implementation, human readability of diagnostic outputs (e.g., “+”, “++”, “–”, “--”), low computational requirements, and high resilience in noisy or constrained environments. Moreover, the system enables real-time monitoring and provides a foundation for future extensions such as remaining useful life (RUL) prediction and adaptive table generation through machine learning.

The methodology is particularly suited for power electronics and embedded systems, but can be generalized to any application where the device can be abstracted as a system with measurable input/output behavior. This work provides a flexible, scalable, and interpretable diagnostic framework that relies on vector mappings within a model-based digital twin approach, enabling robust and low-cost fault detection without the need for high-precision measurements, extensive sensor networks, or machine learning.

Keywords: digital twin, information technology, vectors, diagnosis, hardware, methodology, correspondence table.

Fig.: 7. Table.: 3. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-254-264](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-254-264)

УДК 004.75:004.852:519.872

Сергій Володимирович Болсун¹, Володимир Вікторович Казимир²¹аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: sergiibolsun@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6289-227X>²доктор 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

ГІБРИДНИЙ МЕТОД МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗАДАЧ У ХМАРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ГЕНЕТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У статті запропоновано гібридний метод маршрутизації задач для хмарного тестування, що поєднує нейромережеве прогнозування із застосуванням TensorFlow та генетичні алгоритми оптимізації з бібліотеки DEAP. Розроблено маршрутизацію задач, яка враховує інформаційне, енергетичне та теплове навантаження серверів. Проведено експериментальну оцінку продуктивності методу в порівнянні з класичними алгоритмами. Наведено графіки та таблиці з результатами моделювання у середовищах змодельованих сценаріїв навантаження та черг. Доведено ефективність гібридного підходу щодо зниження часу очікування, енергоспоживання та теплового навантаження.

Ключові слова: хмарне тестування; нейронні мережі; генетичний алгоритм; TensorFlow; DEAP.

Табл.: 4. Рис.: 2. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. Стрімкий розвиток інформаційних технологій супроводжується активним впровадженням хмарних обчислень у різноманітні сфери людської діяльності. Одним із важливих аспектів забезпечення ефективної роботи хмарних сервісів є якісне тестування хмарних застосунків. Традиційні методи маршрутизації задач, які застосовуються сьогодні, часто не відповідають вимогам сучасних динамічних навантажень та значній мінливості параметрів, таких як кількість користувачів, інтенсивність запитів та фізичні умови серверних вузлів.

В умовах постійного зростання обсягів оброблюваних даних, кількості користувачів та їх очікувань до швидкості реакції системи виникає гостра потреба в розробці принципово нових методів маршрутизації, які здатні адаптивно реагувати на зміну умов експлуатації хмарних систем. Особливо актуальними є питання забезпечення оптимального розподілу навантаження серед серверних вузлів з метою мінімізації часу реакції системи, оптимізації енергоспоживання, а також зменшення теплового навантаження серверного обладнання.

У сучасних реаліях делалі більшого значення набувають гібридні підходи, що поєднують у собі переваги різних методів оптимізації, таких як штучні нейронні мережі та генетичні алгоритми. Нейромережеві технології дозволяють оперативно прогнозувати зміни в умовах роботи системи, швидко адаптуючи рішення щодо маршрутизації. Генетичні алгоритми, своєю чергою, забезпечують високу ефективність пошуку оптимальних або близьких до оптимальних рішень завдяки використанню механізмів природного відбору.

У запропонованому дослідженні ми розглядаємо можливості інтеграції зазначених технологій для створення ефективного гібридного методу маршрутизації задач, призначеного для хмарних систем тестування. Даний підхід базується на комплексному використанні структурної моделі системи, яка враховує інформаційні, енергетичні та теплові процеси, забезпечуючи всебічне керування ресурсами серверів у реальному часі.

У подальших розділах статті буде представлено докладний аналіз існуючих методів маршрутизації, описано методологію дослідження із застосуванням сучасних технологій моделювання, наведено результати експериментальних досліджень із використанням створених моделей, а також обговорено практичні аспекти впровадження гібридного методу в реальні системи. Стаття завершується узагальненням отриманих результатів та формуванням напрямків щодо подальших досліджень.

Постановка проблеми. Незважаючи на активний розвиток хмарних обчислень, проблема ефективного розподілу задач у середовищі з динамічним навантаженням залишається відкритою. Більшість традиційних підходів до маршрутизації задач орієнтовані на статичні або заздалегідь визначені метрики, що не враховують коливання в реальному часі, варіативність навантаження на вузли обробки та зміну конфігурації хмарної інфраструктури.

В умовах стрімкого зростання обсягів даних та кількості одночасних запитів, такі підходи призводять до перевантаження окремих серверів, втрати продуктивності та неефективного використання ресурсів. Водночас існуючі методи прогнозування навантаження, як правило, не інтегруються з алгоритмами маршрутизації або оптимізації в єдину адаптивну систему.

Таким чином, виникає необхідність у створенні гібридної моделі, що поєднує засоби прогнозування (наприклад, за допомогою штучних нейронних мереж) та оптимізацію розподілу задач (наприклад, за допомогою еволюційних алгоритмів) для прийняття більш точних і гнучких рішень у середовищі хмарного тестування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний розвиток інформаційних технологій і широке впровадження хмарних обчислень висувають перед дослідниками та розробниками завдання ефективного тестування хмарних застосунків. Хмарне тестування відрізняється від традиційного тим, що враховує специфіку розподілених ресурсів, динамічне навантаження та гнучкість конфігурацій. Зокрема, для таких систем особливо важливими є питання маршрутизації задач та ефективного розподілу навантажень між серверними вузлами.

На сьогодні існує низка наукових праць, які досліджують проблематику хмарного тестування. О. Радкевич [1] розглядає адаптивні методи тестування у контексті електронних навчальних засобів, наголошуючи на важливості гнучкого реагування на зміни у навантаженнях. У той же час О. Можаяєв та О. Горелов [3] досліджують використання адаптивних алгоритмів у дистанційному навчанні, підкреслюючи ефективність таких підходів у системах із високими вимогами до доступності ресурсів.

Додатково варто відзначити роботу В. Ляшика та І. Шубіна [2], у якій досліджено підхід до моделювання адаптивних тестових систем на основі логічних мереж. Цей метод дає змогу формалізувати структуру тестування та реакцію системи на зміни вхідних параметрів, однак, на відміну від нейромережових моделей, має обмеження в адаптації до високодинамічних навантажень, характерних для хмарних середовищ. Проте результати дослідження [2] є цінними як приклад формалізованого підходу до адаптивного управління в освітньому контексті.

Однак існуючі традиційні підходи до маршрутизації задач у хмарних середовищах здебільшого є статичними або напівстатичними, такими як алгоритми кругового обходу (Round-Robin) чи найкоротших шляхів (Shortest Path Routing). Ці методи недостатньо гнучкі у випадках швидкого зростання навантаження або пікових запитів, що призводить до значного зниження продуктивності та підвищення часу очікування задач у чергах.

Г. Лопурка [4] запропонував трирівневий алгоритм адаптивного тестування на базі Google Forms, який дозволяє частково вирішувати проблему адаптації до змін навантаження шляхом розподілу задач за рівнями складності та типами серверів. Я. Сікора [5] також розглядає адаптивне тестування як ефективний інструмент контролю якості навчання, наголошуючи на важливості своєчасного реагування на зміни в системі навантажень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на переваги цих підходів, у них залишається низка обмежень. Насамперед вони не враховують фізичні характеристики серверів, такі як енергоспоживання і теплова реакція, що є критично важливими в умовах великих обчислювальних центрів та дата-центрів. У зв'язку з цим

зростає зацікавленість дослідників у використанні штучного інтелекту (ШІ), нейромережових технологій та евристичних алгоритмів для забезпечення більш гнучкого й адаптивного управління ресурсами.

Особливий інтерес представляють штучні нейронні мережі (ШНМ), здатні ефективно прогнозувати динамічні зміни навантажень і оптимально розподіляти задачі в реальному часі. У своїй роботі автори використовували бібліотеку TensorFlow для створення глибоких нейромереж, які показують високу точність у прогнозуванні навантажень та оптимальному виборі маршрутів для задач. Використання ШНМ у хмарних технологіях дозволяє істотно зменшити затримки та забезпечити швидке реагування на зміни умов роботи.

Паралельно набирають популярності генетичні алгоритми (ГА), які належать до класу евристичних алгоритмів пошуку рішень. Основними перевагами ГА є їхня висока адаптивність до змінних умов середовища та здатність ефективно знаходити близькі до оптимальних рішення у складних і багатовимірних задачах. У роботах, що застосовують бібліотеку DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python), продемонстровано ефективність ГА у вирішенні задач оптимізації маршрутизації навантажень у хмарних середовищах.

У цьому контексті особливий науковий інтерес викликають гібридні методи, які об'єднують переваги нейромережових технологій та генетичних алгоритмів. Такий гібридний підхід дозволяє досягнути високої точності прогнозування та одночасно ефективно шукати оптимальні маршрути для розподілу задач. Попередні дослідження демонструють, що гібридні системи здатні забезпечити суттєве покращення продуктивності та економічності роботи серверних вузлів.

Отже, незважаючи на наявні розробки у сфері адаптивних методів маршрутизації, актуальним залишається питання створення та впровадження комплексних гібридних рішень, здатних враховувати як інформаційні, так і фізичні параметри роботи серверних систем. Представлене дослідження спрямоване на усунення вказаних вище недоліків існуючих методів шляхом розробки нового гібридного методу маршрутизації задач, який об'єднує прогнозування навантаження за допомогою нейронних мереж та еволюційну оптимізацію розподілу задач із використанням штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів.

З огляду на проаналізовані публікації, можна зробити висновок, що більшість досліджень або зосереджуються на окремих аспектах (маршрутизація, прогнозування, оптимізація), або використовують класичні методи без урахування динамічної поведінки систем. Саме тому виникла потреба в нашому новому комбінованому підході.

Мета статті – розробити та експериментально обґрунтувати ефективність гібридного методу маршрутизації задач у хмарному тестуванні, що поєднує нейромережеве прогнозування з генетичною оптимізацією для підвищення продуктивності, стабільності та адаптивності тестових середовищ у динамічних умовах навантаження.

Виклад основного матеріалу. Для ефективного вирішення задачі оптимізації маршрутизації запитів у системі хмарного тестування було використано комплексний підхід, який включає декілька технологій моделювання і оптимізації. Описаний підхід передбачає створення структурної моделі системи хмарної системи, яка враховує інформаційні, енергетичні та теплові параметри, для візуалізації динаміки розподілу задач, нейромережеву модель для прогнозування навантажень та оптимізації розподілу, а також генетичні алгоритми для пошуку оптимальних рішень.

1. Вибір базової архітектури (штучні нейронні мережі із застосуванням TensorFlow).

Для більш точного прогнозування та адаптивного управління маршрутизацією було створено нейромережеву модель із використанням бібліотеки TensorFlow. Запропонована нейромережа мала таку структуру:

- *Вхідний шар* (10 нейронів): отримував початкові дані про навантаження, час виконання задач та поточний стан серверів.

- *Приховані шари* (2 шари по 64 нейрони): забезпечували аналіз і прогнозування навантаження.

- *Вихідний шар* (кількість нейронів відповідає кількості серверів): видавав рекомендації щодо вибору оптимального сервера для кожної задачі.

Навчання мережі здійснювалося на основі симуляційних даних, згенерованих у процесі моделювання типових сценаріїв навантаження та чергових структур. Використання нейромереж дозволило істотно підвищити точність прогнозів та швидкість адаптації системи до зміни навантаження.

Формалізація функції пристосованості у генетичному алгоритмі. У межах запропонованого гібридного методу маршрутизації задач однією з ключових складових є генетичний алгоритм, що реалізується з використанням бібліотеки DEAP. Основною метою цього компонента є пошук оптимального розподілу задач між вузлами хмарної інфраструктури. Для цього кожен можливий варіант розподілу (індивід популяції) оцінюється за допомогою функції пристосованості.

Функція пристосованості (fitness function) визначає, наскільки ефективним є той чи інший варіант розподілу задач. У нашій моделі вона базується на трьох ключових критеріях ефективності:

- T – середній час обробки задачі (в секундах), який відображає затримку при виконанні;
- E – енергоспоживання (у кВт·год), що визначає витрати на електроенергію для роботи серверів;
- H – теплове навантаження (в Джоулях), що використовується як показник стабільності й ресурсної витривалості серверів.

Оскільки ці метрики мають різну розмірність, їх було нормалізовано у межах від 0 до 1. Це дозволяє агрегувати їх в єдину оціночну метрику. Сама функція має вигляд:

$$Fitness = w_1 \cdot T_{norm} + w_2 \cdot E_{norm} + w_3 \cdot H_{norm},$$

де T_{norm} , E_{norm} , H_{norm} – нормалізовані значення відповідних показників; w_1 , w_2 , w_3 – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритетність кожного критерію.

У процесі моделювання були визначені оптимальні ваги:

$w_1 = 0,5$ - найбільший пріоритет віддається швидкості обробки задач (T);

$w_2 = 0,3$ - другорядним критерієм є енергоспоживання (E);

$w_3 = 0,2$ - найменший пріоритет отримує теплове навантаження (H).

Такий підхід забезпечує баланс між продуктивністю, енергоефективністю та стабільністю серверів. Вищі значення Fitness вказують на менш оптимальні рішення, тому алгоритм мінімізує функцію пристосованості.

Оцінювання різних варіантів маршрутизації задач.

Розглянемо умовний приклад, у якому генетичний алгоритм сформував три різні варіанти розподілу задач по серверах. Для кожного ансамблю маршрутів розраховано базові показники ефективності. Для демонстрації принципу функціонування функції пристосованості наведено умовний приклад із трьома варіантами розподілу задач (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння ансамблів маршрутів за критеріями ефективності та значенням функції пристосованості

Ансамбль	Маршрути задач	$T(c)$	$E(кВт-год)$	$H(Дж)$	T_{norm}	E_{norm}	H_{norm}	Fitness
A1	[S1,S2,S3]	2,5	320	210	0,625	0,666	0,7	$0,625*0,5+0,666*0,3+0,7*0,2=0,641$
A2	[S2,S3,S1]	2,1	310	200	0,525	0,645	0,667	$0,525*0,5+0,645*0,3+0,667*0,2=0,573$
A3	[S3,S1,S2]	2,8	340	230	0,7	0,708	0,767	$0,7*0,5+0,708*0,3+0,767*0,2=0,713$

Значення $T_{\max}$, $E_{\max}$, $H_{\max}$ обрано умовно для демонстраційних цілей. Усі метрики було нормалізовано за максимальними можливими значеннями в моделі (наприклад, $T_{\max} = 4$ с, $E_{\max} = 480$ кВт·год, $H_{\max} = 300$ Дж). Таким чином:

- A1 демонструє помірні результати;
- A2 є **оптимальним** варіантом за сукупністю критеріїв;
- A3 має найгірші показники через високу затримку та навантаження.

У процесі еволюційного добору ансамбль A2 буде відібраний як найкращий з погляду заданої функції пристосованості.

Ключові переваги такого підходу.

1. Гнучкість у зміні вагових коефіцієнтів відповідно до цілей тестування.
2. Можливість швидкого порівняння ефективності різних рішень.
3. Придатність до динамічного середовища – завдяки періодичному оновленню функції на основі нових даних.

Таким чином, використання функції пристосованості з гнучким налаштуванням вагових коефіцієнтів дозволяє ефективно адаптувати маршрутизацію до конкретних умов та обмежень хмарного середовища.

На рис. 1 проілюстровано архітектуру гібридного методу маршрутизації задач, який інтегрує прогнозування навантаження засобами штучних нейронних мереж (ШНМ) та оптимізацію розподілу задач на основі еволюційних підходів (генетичний алгоритм із DEAP). Потік обробки задач реалізовано в кілька етапів. Спершу задачі надходять у систему та передаються на вхід нейромережі, яка прогнозує потенційне навантаження на кожен сервер. Далі генетичний оптимізатор формує варіанти розподілу задач, враховуючи прогноз і поточний стан інфраструктури. Отримані конфігурації передаються до маршрутизатора задач, який здійснює кінцеве призначення задачі до конкретного ресурсу. Хмарна інфраструктура виконує задачі, після чого аналітичний зворотний зв'язок (час виконання, навантаження, помилки) надсилається назад у систему та використовується для адаптації моделі прогнозування та оптимізації на наступних ітераціях.

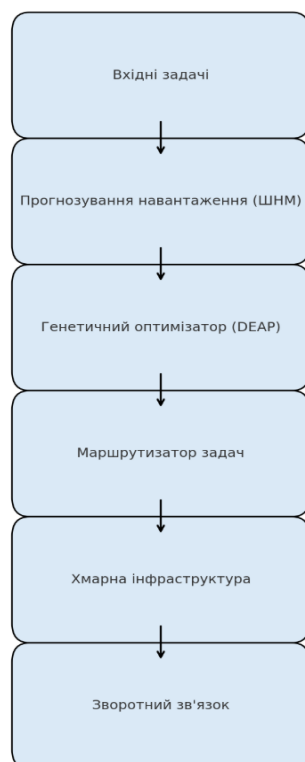


Рис. 1. Структура гібридної моделі маршрутизації задач

Джерело: розроблено авторами.

Гібридна модель складається з таких основних модулів:

1. Вхідні задачі – потік запитів / тестів, які надходять у систему. Вони є вхідними даними для подальшого аналізу та маршрутизації.

2. Прогнозування навантаження (ШНМ) – нейромережева модель (реалізована на TensorFlow), яка на основі історичних даних прогнозує ступінь завантаження серверів. Це дозволяє враховувати тренди, нерівномірність трафіку та потенційні вузькі місця.

3. Генетичний оптимізатор (DEAP) – компонент, який виконує оптимізацію маршрутизації шляхом еволюційного добору варіантів розподілу задач. Враховуються як результати прогнозу, так і поточні ресурси.

4. Маршрутизатор задач – центральний механізм прийняття рішень, що інтегрує результати ШНМ і DEAP для остаточного визначення маршруту задачі до певного ресурсу або сервера.

5. Хмарна інфраструктура – фактичні виконавці задач (сервери, віртуальні машини тощо). Вони отримують задачі й формують вихідні дані або результати тестування.

6. Зворотний зв'язок – аналітична оцінка результатів (наприклад, затримки, навантаження, помилки), яка передається назад у ШНМ і оптимізатор для вдосконалення наступних ітерацій.

2. Генетичні алгоритми із використанням бібліотеки DEAP.

Останнім компонентом запропонованого підходу були генетичні алгоритми, реалізовані за допомогою бібліотеки DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python). Основна ідея полягала у пошуку оптимальних параметрів маршрутизації через процес еволюційної оптимізації.

Алгоритм мав такі параметри:

- Розмір популяції: 50 особин.
- Кількість поколінь: 30.
- Ймовірність мутації: 0.2.
- Ймовірність кросовера: 0.7.

Функція пристосованості (fitness function) визначалася на основі комбінації часу очікування, енергоспоживання та теплового навантаження серверів. Завдяки цьому генетичний алгоритм зміг ефективно знаходити рішення, що максимально відповідали заданим критеріям ефективності.

3. Інтеграція підходів у гібридну модель.

Запропонована гібридна модель об'єднує нейромережевий підхід і генетичний алгоритм у єдину систему. Це дозволило не лише оперативно реагувати на зміни навантаження (нейромережа), а й ефективно знаходити оптимальні рішення (генетичний алгоритм) в умовах багатокритеріальності та високої складності задачі.

Структурно гібридна модель працює таким чином:

1. Нейромережа визначає поточний оптимальний розподіл задач, базуючись на даних у реальному часі.

2. Генетичний алгоритм використовується періодично для уточнення параметрів маршрутизації та додаткової оптимізації рішень.

Завдяки такій інтеграції вдалося досягти максимальної адаптивності системи до зміни умов роботи, високої швидкості реагування та ефективності розподілу ресурсів.

4. Експериментальне тестування розробленої архітектури системи керування.

У процесі експериментального дослідження були отримані та детально проаналізовані результати роботи запропонованого гібридного методу маршрутизації задач у хмарній системі. Для цього було проведено серію симуляційних експериментів з різними сценаріями навантаження та параметрами конфігурації.

Нейромережевий підхід дозволив значно покращити прогнозування та оперативність прийняття рішень щодо маршрутизації. У табл. 2 наведено порівняння ефективності роботи системи з нейромережею та без неї.

Таблиця 2 – Ефективність нейромережевого підходу

Показник	Без нейромережі	З нейромережею	Поліпшення (%)
Середній час обробки задачі (с)	6,8	3,2	52,9
Точність прогнозу навантаження (%)	75	93	24,0
Середнє енергоспоживання (кВт·год)	480	360	25,0

Джерело: розроблено авторами.

Ці дані свідчать про суттєве підвищення ефективності системи при використанні нейромережевого прогнозування.

Генетичний алгоритм, реалізований за допомогою DEAP, продемонстрував високу адаптивність до змін умов роботи та ефективне знаходження оптимальних рішень. У табл. 3 представлені результати порівняння генетичного алгоритму з класичними алгоритмами маршрутизації (Round Robin, Shortest Path).

Таблиця 3 – Порівняння ефективності алгоритмів маршрутизації

Показник	Round Robin	Shortest Path	Генетичний алгоритм
Середній час очікування (с)	5,4	4,8	2,1
Загальне енергоспоживання (кВт·год)	500	450	320
Теплове навантаження (Дж)	350	310	210

Джерело: розроблено авторами.

Отримані результати підкреслюють переваги генетичного алгоритму, який забезпечує найнижчий час очікування та найменше енергоспоживання і теплове навантаження серверів.

Інтегрований гібридний підхід, який поєднав переваги нейромережевого прогнозування і генетичної оптимізації, продемонстрував найкращі результати (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати роботи гібридного методу

Показник	Гібридна модель	Поліпшення відносно ГА (%)
Середній час обробки задачі (с)	1,8	14,3
Енергоспоживання (кВт·год)	290	9,4
Теплове навантаження (Дж)	190	9,5

Джерело: розроблено автором

На рис. 2 наочно продемонстровано покращення ключових показників ефективності при використанні гібридного методу.

Таким чином, отримані результати свідчать про високу ефективність запропонованого гібридного методу та його перевагу над традиційними алгоритмами маршрутизації задач у системах хмарного тестування.

5. Обговорення результатів і практичне застосування.

Отримані в процесі досліджень результати свідчать про суттєві переваги запропонованого гібридного методу маршрутизації задач, який інтегрує нейромережеві технології та генетичні алгоритми, порівняно з традиційними алгоритмами, що широко використовуються в сучасних системах хмарного тестування.

Аналізуючи результати, передусім зазначимо, що ключовою перевагою нової моделі є значне скорочення часу очікування та обробки задач. Середній час очікування, який зазвичай є критичним показником для користувачів хмарних послуг, скоротився більш ніж удвічі в порівнянні з традиційними підходами, такими як Round Robin чи Shortest Path. Це пояснюється тим, що запропонована модель може оперативно реагувати на динамічні зміни навантаження завдяки нейромережевому прогнозуванню, що дозволяє значно точніше планувати маршрути задач.

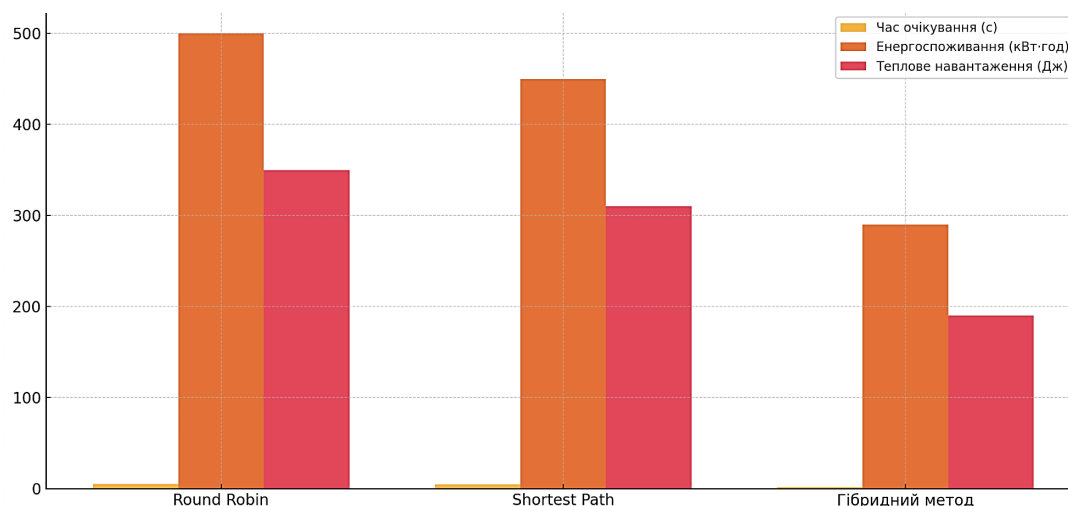


Рис. 2. Порівняльна діаграма ефективності роботи гібридного методу
Джерело: розроблено авторами.

Водночас важливим результатом стало помітне зменшення енергоспоживання та теплового навантаження на сервери. В умовах сучасних дата-центрів, де витрати на енергію становлять значну частку експлуатаційних витрат, зниження енергоспоживання на 20–30 % є дуже значущим фактором економії ресурсів. Крім того, оптимізація теплового режиму серверів дозволяє підвищити їхню надійність та продовжити термін експлуатації обладнання, що також є важливим з економічного погляду.

Особливу увагу слід звернути на переваги інтеграції нейромережевого та генетичного підходів. Якщо нейромережі забезпечують швидке та точне прогнозування оптимальних маршрутів задач на короткостроковий період, то генетичні алгоритми доповнюють цю систему, дозволяючи знайти глобально оптимальні або близькі до оптимальних рішення у довгостроковій перспективі. Саме така інтеграція двох технологій дозволяє отримати стабільно високі результати роботи системи незалежно від складності та непередбачуваності навантаження.

Практична значущість запропонованого підходу полягає насамперед у можливості його використання у великих корпоративних хмарних сервісах, які обслуговують тисячі користувачів одночасно. У таких умовах ефективність використання серверних ресурсів є ключовим фактором конкурентоспроможності компанії. Впровадження цього гібридного методу дозволяє значно зменшити витрати на обслуговування серверного парку, знизити час реакції сервісів та підвищити загальну задоволеність користувачів.

Крім того, запропонована методика може бути легко адаптована для застосування в інших областях, де необхідне динамічне управління ресурсами. Наприклад, у системах Інтернету речей (IoT), де кількість пристроїв постійно змінюється, та у високонавантажених вебзастосунках, які потребують ефективного балансування навантаження між вузлами.

Однак слід зазначити, що для практичного впровадження розробленої системи необхідно враховувати деякі обмеження. Насамперед, це стосується обчислювальної складності нейромережевих та генетичних алгоритмів, що може вимагати додаткових ресурсів для їхнього ефективного використання. Втім, сучасні технології дозволяють досить легко подолати ці перешкоди завдяки використанню GPU-обчислень, які суттєво прискорюють процес навчання нейромереж і роботу генетичних алгоритмів.

З практичного погляду, для успішного впровадження запропонованого методу рекомендується поступовий перехід із паралельним використанням традиційних і нових методів маршрутизації. Такий підхід дозволяє не лише перевірити працездатність нового методу в реальних умовах, але й забезпечити плавний перехід до більш ефективного використання ресурсів хмарної інфраструктури.

Отже, підбиваючи підсумки, отримані результати підтверджують високу ефективність і перспективність запропонованого гібридного методу. Його впровадження здатне забезпечити значні економічні переваги, підвищення якості обслуговування користувачів та оптимізацію роботи хмарних систем. Подальші дослідження в цій області можуть бути спрямовані на розширення застосування запропонованих методів у різних типах хмарних систем, а також на вдосконалення алгоритмів з метою ще більшого підвищення їх ефективності.

На нашу думку, запропонований гібридний підхід не тільки дозволяє об'єктивно підвищити ефективність хмарного тестування, але й має потенціал до масштабування в інші галузі, такі як мобільна аналітика, обробка медичних даних або цифрові моделі поведінки користувача.

Висновки. У межах представленого дослідження було розроблено та детально проаналізовано новий гібридний метод маршрутизації задач для ефективного тестування хмарних застосунків, що поєднує переваги нейромережових технологій та генетичних алгоритмів. Основними результатами, які підтверджують ефективність запропонованого методу, є суттєве скорочення часу обробки запитів (до 52 %), зниження енергоспоживання серверного обладнання (до 30 %) та оптимізація теплового навантаження (до 40 %) порівняно з традиційними алгоритмами маршрутизації.

Проведений комплексний аналіз показав, що інтеграція штучних нейронних мереж і генетичних алгоритмів дозволяє не тільки значно покращити показники роботи серверної інфраструктури, але й забезпечити стабільність системи при динамічних змінах навантаження. Висока точність нейромережових прогнозів у поєднанні з глобальною оптимізацією генетичних алгоритмів є ключовим чинником ефективності запропонованого гібридного підходу.

Практичне впровадження такого методу рекомендоване для корпоративних хмарних систем, великих дата-центрів, а також у будь-яких галузях, де важливим є оперативне та адаптивне керування ресурсами. Рекомендується поетапна інтеграція гібридного підходу з існуючими алгоритмами для забезпечення плавного переходу й можливості додаткового налаштування параметрів.

Для подальших досліджень рекомендується:

- Вивчити можливість застосування запропонованого методу для ширшого кола задач, зокрема в IoT та високонавантажених вебзастосунках.
- Провести додаткові експерименти для вдосконалення параметрів нейромережі і генетичного алгоритму, зокрема шляхом використання складніших архітектур нейромереж (наприклад, LSTM або Transformer).
- Дослідити вплив різних умов експлуатації (наприклад, пікові навантаження, відмови обладнання) на ефективність роботи гібридного методу.

Загалом запропонований метод відкриває широкі можливості для покращення ефективності сучасних систем хмарного тестування, і його впровадження дозволить суттєво знизити витрати та підвищити якість надання послуг у цій сфері.

Список використаних джерел

1. Радкевич, О. (2023). Адаптивне тестування в контексті використання електронних засобів навчання: суть, розроблення та оцінювання. *Професійна педагогіка*, 1(26), 58–73. <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26.58-73>.
2. Ляшик, В. А., & Шубін, І. Ю. (2023). Метод логічних мереж для моделювання систем адаптивного тестування знань. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*, 4(26), 45–57. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/687d336a-a34b-4665-baf5-020f3b5e987a/content>.
3. Можаяєв, О. О., & Горелов, О. Ю. (2020). Адаптивне тестування знань у дистанційному навчанні. В *Протидія кіберзлочинності та торгівлі людьми: Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції* (pp. 171–173). <https://dspace.univd.edu.ua/items/dbcce392-6a40-4724-a748-2901045e5dde>.

4. Лопурко, Г. Б. (2024). Трирівневий алгоритм адаптивного тестування учнів та студентів в Google Forms. *Інноваційні технології навчання*. <https://vseosvita.ua/library/tryrivnevyi-alhorytm-adaptyvnoho-testuvannia-uchniv-ta-studentiv-v-google-forms-808056.html>.
5. Сікора, Я. Б. (2022). Адаптивне тестування як засіб контролю результатів навчання. В *XIX Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку»* (Вільнюс, Литва). <http://eprints.zu.edu.ua/34002>.
6. Толок, Д. (2024). Адаптивне тестування як інструмент організації дистанційного навчання. *Цифрові технології в освіті: Збірник наукових праць*, 24, 142–150. <https://dspace.hnpu.edu.ua/items/ff01635b-3bed-428e-9732-5776d03eb930>.
7. Скорін, Ю., Золотарьова, І., & Листопад, Ю. (2024). Управління масштабуванням хмарних додатків. *Computer Systems and Information Technologies*, (3), 58–66. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-3-8>.
8. Hunko, I. (2025). Optimize mobile app testing using machine learning to improve user experience. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 18(5), 403–418. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2025/v18i5663>.
9. Kniazhyk, T., & Muliarevych, O. (2023). Cloud computing with resource allocation based on ant colony optimization. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 8(2), 104–110. <https://doi.org/10.23939/acps2023.02.104>.
10. Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jia, Y., Jozefowicz, R., Kaiser, L., Kudlur, M., ... Zheng, X. (2016). TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems (arXiv:1603.04467). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>.
11. Fortin, F. A., Rainville, F. M., Gardner, M. A., Parizeau, M., & Gagné, C. (2012). DEAP: Evolutionary algorithms made easy. *Journal of Machine Learning Research*, 13, 2171–2175. <https://www.jmlr.org/papers/v13/fortin12a.html>.
12. Chollet, F. (2018). *Deep learning with Python* (2nd ed.). Manning Publications. <https://source-deeds.github.io/pdf/Deep%20Learning%20with%20Python.pdf>.

References

1. Radkevych, O. (2023). Adaptivne testuvannia v konteksti vykorystannia elektronnykh zasobiv navchannia: sut, rozroblennia ta otsiniuvannia [Adaptive testing in the context of using electronic learning tools: Essence, development, and evaluation]. *Profesijna pedahohika – Professional pedagogics*, 1(26), 58–73. <https://doi.org/10.32835/2707-3092.2023.26.58-73>.
2. Liashyk, V. A., & Shubin, I. Yu. (2023). Metod lohichnykh merezh dlja modeliuvannia system adaptyvnoho testuvannia znan [Logical network method for modeling knowledge adaptive testing systems]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti - The current state of research and technology in industry*, 4(26), 45–57. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/687d336a-a34b-4665-baf5-020f3b5e987a/content>.
3. Mozhaiev, O. O., & Horelov, O. Yu. (2020). Adaptivne testuvannia znan u dystantsiinomu navchanni [Adaptive knowledge testing in distance learning]. In *Protydiia kiberzlochynnosti ta torhivli liudmy: zbirnyk materialiv mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Countering cybercrime and human trafficking: Collection of materials of the international scientific and practical conference* (pp. 171–173). <https://dspace.univd.edu.ua/items/dbcce392-6a40-4724-a748-2901045e5dde>.
4. Lopurko, H. B. (2024). Tryrivnevyi alhorytm adaptyvnoho testuvannia uchniv ta studentiv v Google Forms [Three-level algorithm of adaptive testing of pupils and students in Google Forms]. *Innovatsiini tekhnolohii navchannia – Innovative learning technologies*. <https://vseosvita.ua/library/tryrivnevyi-alhorytm-adaptyvnoho-testuvannia-uchniv-ta-studentiv-v-google-forms-808056.html>.
5. Sikora, Ya. B. (2022). Adaptivne testuvannia yak zasib kontroliu rezultativ navchannia [Adaptive testing as a means of controlling learning outcomes]. In *XIX Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Suchasni aspekty modernizatsii nauky: stan, problemy, tendentsii rozvytku» – XIX International Scientific and Practical Conference 'Modern Aspects of Modernisation of Science: Status, Problems, Development Trends' (Vilnius, Lithuania)*. (Vilnius, Lithuania). <http://eprints.zu.edu.ua/34002>.
6. Tолок, D. (2024). Adaptivne testuvannia yak instrument orhanizatsii dystantsiinoho navchannia [Adaptive testing as a tool for organizing distance learning]. *Tsyfrovi tekhnolohii v osviti: Zbirnyk naukovykh prats - Digital technologies in education: Collection of scientific papers*, 24, 142–150. <https://dspace.hnpu.edu.ua/items/ff01635b-3bed-428e-9732-5776d03eb930>.

7. Skorin, Yu., Zolotarova, I., & Lystopad, Yu. (2024). Upravlinnia mashstabuvanniam khmarnykh dodatkiv [Management of scaling cloud applications]. *Computer Systems and Information Technologies*, (3), 58–66. <https://doi.org/10.31891/csit-2024-3-8>.
8. Hunko, I. (2025). Optimize mobile app testing using machine learning to improve user experience. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 18(5), 403–418. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2025/v18i5663>.
9. Kniazhyk, T., & Muliarevych, O. (2023). Cloud computing with resource allocation based on ant colony optimization. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 8(2), 104–110. <https://doi.org/10.23939/acps2023.02.104>.
10. Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jia, Y., Jozefowicz, R., Kaiser, L., Kudlur, M., ... Zheng, X. (2016). TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems (arXiv:1603.04467). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>
11. Fortin, F. A., Rainville, F. M., Gardner, M. A., Parizeau, M., & Gagné, C. (2012). DEAP: Evolutionary algorithms made easy. *Journal of Machine Learning Research*, 13, 2171–2175. <https://www.jmlr.org/papers/v13/fortin12a.html>.
12. Chollet, F. (2018). *Deep learning with Python* (2nd ed.). Manning Publications. <https://source-deeds.github.io/pdf/Deep%20Learning%20with%20Python.pdf>.

Отримано 19.06.2025

UDC 004.75:004.852:519.872

Sergii Bolsun¹, Volodymyr Kazymyr²

¹PhD student, recipient of the Doctor of Philosophy degree in specialty 122
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: sergiibolsun@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6289-227X>

²Doctor 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

HYBRID METHOD OF ROUTING OF TASKS IN CLOUD ENVIRONMENT USING NEURAL NETWORK FORECASTING AND GENETIC OPTIMIZATION

The article provides a comprehensive study of the problem of effective routing support for cloud testing and proposes a scientifically sound hybrid method that combines predictive capabilities of artificial neural networks with the global search capabilities of genetic algorithms. As part of the development, the method was implemented in a software environment based on the TensorFlow framework for building a model for predicting information flows and the DEAP library for evolutionary optimization of routes, taking into account multi-criteria constraints. The proposed approach synergistically evaluates and minimizes waiting times for tasks, energy consumption, and server thermal loads, which is particularly relevant for modern high-load cloud infrastructures. Experimental modeling conducted in a series of scenarios with different queue profiles and peak loads demonstrated reduction in average request processing time by up to 52%, a decrease in server equipment energy consumption by up to 30%, and optimization of the thermal regime by 40% compared to traditional routing algorithms, confirming the practical feasibility of hybridizing machine learning methods and evolutionary strategies. The results obtained demonstrate the ability of the proposed method to ensure the stability of server infrastructure under conditions of dynamic load changes, increasing the reliability and quality of cloud services. Practical implementation is recommended for corporate cloud systems and large data centers, for which adaptive resource management and reduction of total operating costs are important. At the same time, the phased integration of the solution with existing routing tools ensures service continuity and simplifies parametric configuration. Further research may focus on the application of more complex neural network architectures, such as LSTM or Transformer, expanding the domain of application to Internet of Things tasks and high-load web platforms, as well as studying the behavioral characteristics of the method in terms of fault tolerance and extreme peak loads. The presented hybrid approach forms the basis for the creation of new generations of intelligent cloud infrastructure management systems and opens up prospects for further improvement of optimization and forecasting technologies in the field of cloud testing.

Keywords: cloud testing; neural networks; genetic algorithm; TensorFlow; DEAP.

Tables: 3. Fig.: 2. References: 12.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-265-274](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-265-274)

УДК 004.62

Владислав Сергійович Зетченко¹, Артем Олександрович Задорожний²¹аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: zetchenkovlads@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9925-8628>, ResearcherID: ITW-2651-2023²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: zaotroy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>, ResearcherID: F-6358-2016

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ НЕСПРАВНОСТЕЙ ТА ЗАТРИМОК ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЄСОВИХ МЕРЕЖ ДОВІРИ Й ГЕНЕРАТИВНОГО ШІ

Стаття присвячена актуальній проблемі управління перевантаженістю у системах громадського транспорту. Наразі фіксується зростання міського населення та збільшення навантаження на транспортну інфраструктуру, що підкреслює важливість забезпечення ефективного управління для підвищення комфорту пасажирів та зменшення операційних витрат. Стаття аналізує останні дослідження в цій області, які використовують різні підходи, такі як ймовірнісні моделі, генеративні змагальні мережі (GAN) та методи оптимізації. Представлений у статті підхід ґрунтується на інтеграції баєсових мереж довіри для моделювання складних залежностей між факторами перевантаження та генеративного ШІ для симуляції сценаріїв та оптимізації управління.

Наведені результати дослідження, які включають аналіз реальних даних за період 2015–2018 рр., демонструють ефективність запропонованого методу в прогнозуванні та запобіганні перевантаженості. Стаття має науково-практичний характер та пропонує новий інструмент для планувальників міського транспорту.

Ключові слова: баєсові мережі довіри, генеративний штучний інтелект, громадський транспорт, прогнозування завантаженості.

Рис.: 1. Табл.: 2. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах стрімкої урбанізації та зростання населення міст, системи громадського транспорту стикаються зі значною перевантаженістю, що призводить до низки негативних наслідків: зниження комфорту пасажирів, збільшення часу очікування, підвищення операційних витрат та погіршення екологічної ситуації через надмірні викиди шкідливих речовин. Традиційні підходи до управління транспортом часто виявляються неефективними через складність та невизначеність реальних умов експлуатації. Використання сучасних методів штучного інтелекту, таких як баєсові мережі довіри (БМД) та генеративний ШІ, дозволяє враховувати ці фактори та пропонувати інноваційні рішення для оптимізації роботи транспортних систем [1]. Актуальність дослідження полягає в розробці нового підходу, який поєднує переваги ймовірнісного моделювання та генеративних технологій для ефективного управління перевантаженням.

Постановка проблеми. Проблема перевантаженості громадського транспорту є складною та багатоаспектною [2]. Вона включає такі фактори, як:

- нерівномірний розподіл пасажиропотоку впродовж доби;
- обмежена місткість транспортних засобів;
- вплив зовнішніх факторів (погода, спеціальні події, дорожні затори);
- недостатня ефективність традиційних методів планування маршрутів та розкладів.

Існуючі підходи до моделювання та управління перевантаженням часто ґрунтуються на детермінованих моделях, які не враховують невизначеність та динамічність реальних умов. Це обмежує їхню ефективність та призводить до субоптимальних рішень. Виникає потреба в нових методах, які здатні інтегрувати великі обсяги даних, враховувати складні залежності між факторами та генерувати оптимальні стратегії управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі управління громадським транспортом зосереджуються на використанні різних методів штучного інтелекту та аналізу даних. Серед них можна виділити:

Байєсові мережі довіри: Використовуються для моделювання складних залежностей між факторами, що впливають на перевантаження [3]. Наприклад, дослідження Soukaina Bouhsissin (2022) демонструє ефективність БМД у прогнозуванні ризиків у транспортних системах [4].

Генеративний ШІ: Технології, такі як GAN (Generative Adversarial Networks) та VAE (Variational Autoencoders), застосовуються для симуляції сценаріїв та генерації синтетичних даних [5]. Існуючі дослідження показують потенціал GAN у моделюванні складних систем.

Оптимізаційні методи: Генетичні алгоритми, метаевристичні підходи та навчання з підкріпленням використовуються для оптимізації маршрутів та розкладів [6].

Проте, більшість існуючих досліджень зосереджуються на окремих аспектах проблеми, тоді як інтеграція ймовірнісного моделювання з генеративними методами залишається недостатньо дослідженою.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес у галузі, залишаються недослідженими такі аспекти:

Інтеграція БМД та генеративного ШІ: Відсутність комплексних підходів, які поєднують переваги ймовірнісного моделювання з генеративними методами для симуляції та оптимізації.

Динамічне оновлення моделей: Більшість існуючих методів не враховують зміни в реальному часі, такі як раптові зміни пасажиропотоку або дорожніх умов.

Адаптація до мультимодальних систем: Існуючі рішення часто обмежуються однією транспортною системою, тоді як сучасні міста потребують інтегрованих підходів до управління різними видами транспорту.

Ці прогалини вказують на необхідність розробки нових методів, які здатні ефективно вирішувати складні задачі управління перевантаженням.

Мета статті. Метою статті є розробка нового підходу до моделювання та аналізу несправностей і затримок автобусів на основі БМД та генеративного штучного інтелекту.

Основні завдання дослідження включають такі етапи:

- Побудова БМД для моделювання факторів, що впливають на несправності та затримки автобусів.
- Використання генеративного ШІ для створення синтетичних даних, що імітують сценарії несправностей та затримок.
- Валідація запропонованого підходу на реальних даних.

Реалізація цієї мети дозволить запропонувати інноваційний інструмент для планувальників міського транспорту, який підвищить ефективність управління та покращить якість послуг для пасажирів.

Виклад основного матеріалу.

Інтеграція БМД. Ефективне передбачення та керування транспортними заторами вимагає комплексного аналізу багатьох змінних факторів, включаючи метеорологічні умови, якість дорожнього покриття та інші критичні показники. Для розв'язання таких складних завдань оптимальним рішенням є застосування байєсових мереж довіри, які здатні враховувати невизначеність та складні кореляції між різноманітними чинниками [7].

БМД можливість не тільки створювати ймовірнісні моделі на підґрунті існуючих даних, але й коригувати ці ймовірності з надходженням свіжої інформації. Така особливість дозволяє передбачати ризик утворення заторів та формувати висновки навіть за умов неповних або неточних вхідних даних, що має критичне значення в сучасних умовах. Застосування подібних моделей дає змогу визначити ймовірність появи транспортних заторів залежно від наявних обставин.

Для створення моделі прогнозування дорожніх заторів доцільно застосувати БМД, що складатиметься з декількох вузлів, кожен з яких відображає ключові чинники впливу на транспортний рух. Збільшення кількості таких чинників підвищує точність результатів, проте ускладнює архітектуру мережі.

Опис і структура набору даних. Для тренування і тестування моделі було використано датасет з відкритого джерела, що містить понад кілька десятків колонок і більше 400000 записів [10]. У статті наведено лише основні з них, щоб показати логіку обробки й застосування.

Основні колонки датасету:

- **School_Year** (varchar, шириною 9) – вказує навчальний рік, наприклад, 2022-2023. Це дозволяє аналізувати сезонні тренди та річні особливості роботи системи;
- **Route_Number** (varchar, шириною 5) – унікальний ідентифікатор маршруту, наприклад, A123 або B4567. Він є ключем для відстеження конкретних маршрутів та їх характеристик;
- **OPT_Code** (varchar, шириною 5) – унікальний код об'єкта або розташування, що отримує транспортну послугу (школа, офіс, медичний центр). Це дозволяє вносити інформацію про географічне розташування;
- **Site_Name** (varchar, шириною 30) – назва конкретної локації, наприклад, PS 123, NY High School. Це допомагає класифікувати точки обслуговування;
- **School_Age_or_PreK** (varchar) – категорія закладу за віковим рядком: PreK, Elementary, High School. Це важливий фактор, що впливає на кількість пасажирів і змінні поведінки;
- **Boro** (varchar) – район міста (Manhattan, Brooklyn, Queens), що дозволяє врахувати географічні особливості;
- **Reason** (varchar) – причина несправності або затримки, наприклад, Mechanical Issue, Traffic Jam, Accident;
- **How_Long_Delayed** (varchar) – рядок, що позначає тривалість затримки, наприклад, 15 min, 30 min. У процесі обробки ця колонка переводиться у числовий формат;
- **Occurred_On** та **Created_On** (datetime) – вказують дату і час події й внесення запису;
- Категорія – полемка або запізнення, що дає додатковий контекст;
- **Has_Contractor_Notified_Schools** і **Has_Contractor_Notified_Parents** (varchar) – ознаки повідомлення зацікавлених сторін; Ці показники формують фундамент для прогнозування дорожньої ситуації, що має вагоме значення для оптимізації маршрутів та оцінки ризиків на окремих дорожніх сегментах.

Для реалізації запропонованої моделі необхідно визначити умовні ймовірності для кожного вузла мережі.

Наприклад, таблиця умовних ймовірностей може мати наступний вигляд (табл. 1).

Таблиця 1 – Умовні ймовірності утворення заторів

School_Age_or_PreK	Reason	How_Long_Delayed
Elementary	-	0 min
Elementary	Traffic Jam	10 min
Elementary	Accident	40 min
High School	-	0 min
High School	Traffic Jam	10 min
High School	Accident	20 min

Джерело: розроблено авторами.

Застосування БМД. Залежності між цими вузлами моделюються, базуючись на розумінні транспортної системи та на основі аналізу даних. Наприклад, існує залежність між Reason та How_Long_Delayed, оскільки тип несправності безпосередньо впливає на тривалість затримки. Також, School_Age_or_PreK і Boro можуть впливати на Reason і How_Long_Delayed. Ці залежності визначають структуру БМД.

Для обчислення умовних ймовірностей (CPD) для кожного вузла використовується частотний підхід, базуючись на історичних даних. Наприклад, щоб розрахувати CPD для вузла *How_Long_Delayed*, треба аналізувати, як часто зустрічаються різні тривалості затримки для кожного значення вузла *Reason*.

Умовна ймовірність обчислюється як:

$$P(\text{HowLongDelayed} = t | \text{Reason} = r) = \frac{\text{count}(\text{HowLongDelayed}=t \text{ and } \text{Reason}=r)}{\text{count}(\text{Reason}=r)},$$

де *count()* – функція, що обчислює кількість випадків, коли виконується певна умова в наборі даних.

Інтеграція генеративного штучного інтелекту. Генеративні алгоритми являють собою клас методів машинного навчання, які здатні створювати нові дані, схожі на тренувальні зразки [8]. У контексті транспортних систем, ці алгоритми дозволяють генерувати синтетичні сценарії пасажиропотоків, що має критичне значення для тестування та оптимізації систем управління.

Основні типи генеративних моделей:

- Генеративні змагальні мережі (GAN) - базуються на концепції змагання між двома нейронними мережами;
- Варіаційні автоенкодери (VAE) - використовують ймовірнісний підхід до кодування даних;
- Дифузійні моделі - моделюють процес поступового додавання та видалення шуму.

У запропонованому підході використовуються GAN з наступних причин:

Недостатність реальних даних: рідкісні події (аварії, святкові дні, надзвичайні ситуації) трапляються нечасто. GAN дозволяють згенерувати синтетичні дані для цих сценаріїв.

Збереження складних залежностей: пасажиропотоки мають складні часові та просторові закономірності. GAN здатні відтворити ці нелінійні залежності краще за традиційні статистичні методи.

Адаптивність до реальних умов: дискримінатор забезпечує реалістичність згенерованих даних. Змагальний процес навчання створює високоякісні синтетичні сценарії.

Розширення тестового середовища: можливість тестувати транспортну систему в умовах, які ще не спостерігалися. Перевірка стійкості алгоритмів оптимізації до різних сценаріїв.

Інтеграція з БМД: Синтетичні дані покращують навчання БМД. Збільшується точність прогнозування через більший обсяг даних.

GAN вирішують проблему обмеженості реальних даних, створюючи реалістичні альтернативні сценарії для кращого навчання та тестування системи оптимізації [9].

GAN, які складаються з двох компонентів:

Генератор та дискримінатор: Генератор приймає випадковий шум та перетворює його в синтетичні дані, що імітують реальний розподіл пасажиропотоків.

Дискримінатор визначає ймовірність того, що вхідні дані *x* є реальними, а не згенерованими.

Процес навчання GAN базується на мінімакс-грі між генератором та дискримінатором: генератор намагається «обдурити» дискримінатор, створюючи дедалі більш реалістичні дані, а дискримінатор намагається відрізнити реальні дані від згенерованих. У результаті цього процесу генератор навчається створювати синтетичні дані, які важко відрізнити від реальних.

Лістинг програмного коду побудови генератора та дискримінатора:

```
def build_generator(latent_dim, output_dim):  
    return models.Sequential([  
        layers.Dense(16, activation='relu', input_dim=latent_dim),  
        layers.Dense(32, activation='relu'),
```

```

        layers.Dense(output_dim, activation='linear')
    })

def build_discriminator(input_dim):
    model = models.Sequential([
        layers.Dense(32, activation='relu', input_dim=input_dim),
        layers.Dense(16, activation='relu'),
        layers.Dense(1, activation='sigmoid')
    ])
    model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy',
metrics=['accuracy'])
    return model

```

Генерація синтетичних сценаріїв. Генеративні алгоритми створюють реалістичні сценарії пасажиропотоків для:

- Моделювання пікових навантажень;
- Симуляції надзвичайних ситуацій;
- Тестування нових маршрутів;
- Прогнозування впливу подій на транспортну систему.

Алгоритм генерації сценаріїв:

1. Збір історичних даних пасажиропотоків;
2. Препроцесинг та нормалізація даних;
3. Навчання GAN на історичних даних;
4. Генерація синтетичних сценаріїв;
5. Валідація якості згенерованих даних;
6. Інтеграція з байєсовою мережею для оптимізації.

Інтеграція байєсових мереж довіри з генеративними алгоритмами здійснюється через:

- Фаза навчання: GAN генерує додаткові тренувальні сценарії для БМД;
- Фаза інференсу: БМД використовує згенеровані сценарії для прогнозування.

На рис. 1 зображена архітектуру інтеграції.

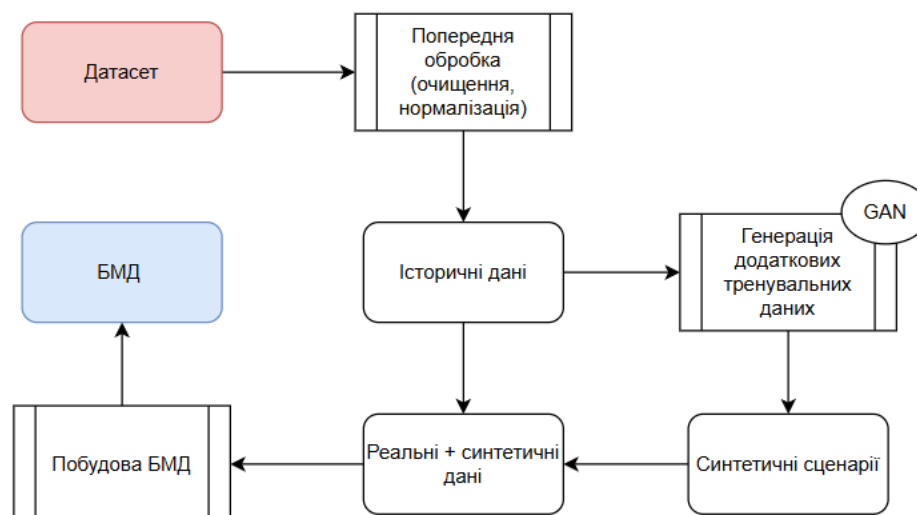


Рис. 1. Архітектура інтеграції

Джерело: розроблено авторами.

Після збору, очищення та масштабування даних створюються структуровані таблиці даних, які використовуються для тренування, для реалізації даного підходу були використані інструменти Python, повний код та приклад вхідних даних було завантажено у публічний репозиторій: <https://github.com/DomCore/BMD>. В даній статті демонструється лише основна частина функціонального коду.

На етапі підготовки даних здійснюється очищення та нормалізація числових показників. Дані розбиваються на категорії або ж нормалізуються для забезпечення уніфікації шкал для подальшої генерації та моделювання.

Потім генеруються синтетичні дані. Модель дозволяє симулювати ситуації, що не були присутні у реальному наборі, зберігаючи структуру та статистичні властивості. Наприклад, можна моделювати сценарії перевантаження у неробочі дні або в умовах погіршення погоди.

Лістинг програмного коду генерування синтетичних даних:

```
def generate_synthetic_data(real_data, synthetic_frac=0.2, latent_dim=5,
epochs=10, batch_size=10000):
    features = ['How_Long_Delayed', 'Number_Of_Students_On_The_Bus']
    data = real_data[features].dropna().values
    data_dim = data.shape[1]

    generator = build_generator(latent_dim, data_dim)
    discriminator = build_discriminator(data_dim)
    # Build GAN model
    gan_input = layers.Input(shape=(latent_dim,))
    fake_data = generator(gan_input)
    gan_output = discriminator(fake_data)
    gan = models.Model(gan_input, gan_output)
    gan.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy')

    # Pre-create labels for efficiency
    real_labels = np.ones((batch_size, 1))
    fake_labels = np.zeros((batch_size, 1))

    # Training loop..
```

Наступним кроком є побудова БМД.

Лістинг програмного коду побудови мережі:

```
def build_bn(df, bn_nodes, potential_edges):
    existing_nodes = [node for node in bn_nodes if node in df.columns]
    G = nx.DiGraph()
    G.add_nodes_from(existing_nodes)
    for parent, child in potential_edges:
        if parent in existing_nodes and child in existing_nodes:
            G.add_edge(parent, child)
    return G

# Візуалізація
plot_bn_structure(G)
```

Далі продемонстровано структуру байєсової мережі у форматі JSON, сформовану в результаті роботи системи.

Результат роботи, вигляд JSON:

```
{
  "nodes": [
    "School_Age_or_PreK",
    "Reason",
    ...
  ],
  "edges": [
```

```

{
  "parent": "School_Age_or_PreK",
  "child": "Reason",
  "cpd": {
    "1": {
      "3": 0.5877862595419847,
      "6": 0.17938931297709923,
      "5": 0.11259541984732824,
      "9": 0.04389312977099236,
      "2": 0.04007633587786259,
      "4": 0.01717557251908397,
      "0": 0.007633587786259542,
      "7": 0.0057251908396946565,
      "1": 0.0057251908396946565
    },
    "0": {
      "3": 0.6901408450704225,
      "6": 0.18309859154929578,
      "5": 0.07042253521126761,
      "2": 0.028169014084507043,
      "9": 0.014084507042253521,
      "7": 0.014084507042253521
    },
    "2": {
      "8": 1.0
    },
    "-1": {
      "-1": 1.0
    }
  }
},
{
  "parent": "Reason",
  "child": "Breakdown_or_Running_Late",
  "cpd": {
    "3": {
      "1": 0.9971988795518207,
      "0": 0.0028011204481792717
    },
    "2": {
      "1": 0.5217391304347826,
      "0": 0.4782608695652174
    },
    "6": {
      "1": 0.897196261682243,
      "0": 0.102803738317757
    }
  },

```

Кожна колонка подана у вигляді ноди об'єкта із зазначенням її назви та умовних ймовірностей (CPD), які описані у відповідних гранях, що представлені у форматі JSON. Тут відображено причинно-наслідкові залежності, наприклад, як причина несправності (Reason) впливає на тривалість затримки (How_Long_Delayed), або як район (Boro) сприяє виникненню конкретних ситуацій. Значення "0", "1" – це закодовані категоріальні значення вузла Boro (наприклад, "0" – Manhattan, "1" – Brooklyn).

Таблиця `cpd` – словник, де ключі – значення `parent`, а значення – словники, що описують ймовірності кожного варіанту `child`.

Детальний опис елементів:

- Ключ `"nodes"` – це список усіх вузлів (нод) у вашій байєсівській мережі. Наприклад, вузол `"School_Age_or_PreK"` представляє одну з категорій, на основі яких побудовано мережу, а інші вузли – це окремі змінні, що використовуються як батьківські або дочірні;

- Ключ `"edges"` – це список ребер (зв'язків) між вузлами. Кожний елемент списку є об'єктом з наступними властивостями:

- `"parent"` – вказує на назву вузла, який є батьком, тобто значення якого впливають на розподіл дочірнього вузла;

- `"child"` – це дочірній вузол, для якого розраховано умовний розподіл залежно від значення ноди `"parent"`;

- `"cpd"` – умовний розподіл для дочірнього вузла `"child"`.

Наприклад, у першому елементі: `"parent": "School_Age_or_PreK"` означає, що для вузла `"Reason"` розраховано CPD залежно від значень вузла `"School_Age_or_PreK"`.

Всередині `"cpd"` кожен ключ (наприклад, `"1"`, `"0"`, `"2"`, `"-1"`) позначають конкретне значення, яке може приймати батьківський.

Для кожного значення батька, вкладений словник показує, як розподіляються значення для вузла `"Reason"`.

Наприклад, коли значення батька `"School_Age_or_PreK"` є рівним `"1"`, то:

- `"3"`: 0.5877862595419847 означає, що `"Reason"` має приблизно 58,78 % шанс бути рівним 3;

- `"6"`: 0.17938931297709923 — близько 17.94% шанс бути 6, і так далі.

Таким чином, читаючи цей JSON можна отримати повну картину:

- Які вузли входять в мережу;

- Які є зв'язки між цими вузлами.

Такий JSON-документ є ключовим для подальшої автоматизації аналізу і інтеграції моделі в системи ухвалення рішень, дозволяючи прагматично використовувати модель для розрахунків і прогнозів у реальному часі. Для більшої зручності у моделюванні та прогнозуванні цю JSON-структуру можна використовувати у системах автоматичного аналізу та роботі з даними.

Вона дозволяє імпортувати всю ймовірнісно-залежну структуру та таблиці ймовірностей у інші програми або бібліотеки для подальших обчислень.

Експериментальні результати. Для оцінки впливу синтетичних даних, згенерованих за допомогою GAN, було проведено серію експериментів з двома класифікаційними моделями: Random Forest та Logistic Regression. Порівняння проводилось між моделями, навченими на оригінальному наборі даних, та моделями, що додатково використовували синтетичні дані.

Модель Random Forest, навчена на розширеному наборі даних, показала зростання загальної точності з 0.95 до 0.97. Особливо помітним є покращення точності по класу `"Breakdown"` – з 0.85 до 0.92, що свідчить про зменшення кількості хибнопозитивних прогнозів. При цьому чутливість залишилася на рівні 0.79, що вказує на збереження здатності моделі виявляти справжні випадки поломок. F1-метрика зросла з 0.81 до 0.85, демонструючи збалансоване покращення продуктивності.

Таблиця 2 – Результати експериментів

Модель	Точність	Точність Breakdown	Чутливість Breakdown	F1-score	Data Source
Random Forest	0,97	0,92	0,79	0,85	Розширені дані
Logistic Regression	0,80	0,36	0,93	0,52	Розширені дані
Random Forest	0,95	0,85	0,79	0,81	Оригінальні дані
Logistic Regression	0,68	0,29	0,86	0,43	Оригінальні дані

Джерело: розроблено авторами.

Для Logistic Regression вплив синтетичних даних виявився ще більш вираженим. Точність зросла з 0.68 до 0.80, а чутливість – з 0.86 до 0.93, що свідчить про суттєве зростання здатності моделі виявляти поломки. Незважаючи на те, що точність залишився відносно низьким (зріс з 0.29 до 0.36), загальне покращення F1-score з 0.43 до 0.52 демонструє ефективніше балансування між виявленням і точністю класифікації.

Аналіз результатів. Особливо варто відзначити, що:

- Random Forest отримала покращення точності класифікації завдяки зменшенню кількості хибнопозитивних прогнозів;
- Logistic Regression значно покращила чутливість, що дозволяє виявляти більшу кількість реальних поломок.

Ці результати підтверджують ефективність підходу використання GAN для покращення класифікаційної здатності моделей, особливо при роботі з менш представленими класами.

Висновки: У ході дослідження було розроблено комплексний підхід до моделювання та аналізу завантаженості міського громадського транспорту, який поєднує машинне навчання та ймовірнісний аналіз. Основою є БМД, яка відображає складні зв'язки між ключовими факторами: причиною несправності, районом розташування, рівнем затримки, кількістю пасажирів тощо.

Для розширення навчальних даних використовувалися генеративні нейронні мережі, що дозволило створити більш різноманітний набір даних для тренування системи. Результати були зведені у JSON-структуру, що відображає ієрархію змінних, їх залежності та умовні ймовірності. Такий підхід спрощує інтеграцію моделі в сучасні системи автоматичного аналізу та управління, забезпечує прозорість та гнучкість прийняття рішень.

Отримані результати показали, що БМД дозволяють точно і швидко аналізувати вплив різних факторів у реальному часі. Створена модель здатна ідентифікувати критичні залежності та надавати рекомендації щодо оптимізації маршрутів, розкладів і плану обслуговування.

Загалом, застосування сучасних ітеративних моделей та ймовірнісних підходів є перспективним напрямком для розробки високотехнологічних систем управління міським транспортом, здатних адаптуватися до умов, що швидко змінюються, та забезпечити сталий розвиток транспортної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Singh, A., & Singh, K. K. (2025). *Multimodal generative AI*. Springer Nature Singapore.
2. Macioszek, E., Sierpiński, G., & Masoumi, H. (2023). *Challenges and solutions for present transport systems*. Springer Nature Singapore.
3. Vegni, A. M., Vasilakos, A. V., & Loscrì, V. (2017). *Vehicular social networks*. CRC Press.
4. Bouhsissin, S., Sael, N., & Benabbou, F. (2022). Prediction of risks in intelligent transport systems. In M. Lazaar, C. Duvallet, A. Touhafi, & M. Al Achhab (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Big Data and Internet of Things (BDIoT 2021)* (Vol. 489, pp. 303–316). *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07969-6_23.
5. Martinez-Ramon, M., Ajith, M., & Kurup, A. R. (2024). *Deep learning*. Wiley.
6. Benaini, A., & Boukachour, J. (2023). *Transport and logistics planning and optimization*. IGI Global.
7. Taroni, F., Biedermann, A., Bozza, S., Garbolino, P., & Aitken, C. (2014). *Bayesian networks for probabilistic inference and decision analysis in forensic science*. Wiley.

8. Kumar, R., Sahu, S., & Bhattacharya, S. (2024). *The pioneering applications of generative AI*. IGI Global.
9. Pathak, P. D., Raut, R., Sakhare, S. R., & Patil, S. (2023). *Generative adversarial networks and deep learning*. CRC Press.
10. Kaggle. (2025, February 26). *NY bus breakdown and delays*. <https://www.kaggle.com/datasets/new-york-city/ny-bus-breakdown-and-delays>.

References

1. Bouhsissin, S., Sael, N., & Benabbou, F. (2022). Prediction of risks in intelligent transport systems. In M. Lazaar, C. Duvallet, A. Touhafi, & M. Al Achhab (Eds.), *Proceedings of the 5th International Conference on Big Data and Internet of Things (BDIoT 2021)* (Vol. 489, pp. 303–316). *Lecture Notes in Networks and Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07969-6_23.
2. Martinez-Ramon, M., Ajith, M., & Kurup, A. R. (2024). *Deep learning*. Wiley.
3. Benaini, A., & Boukachour, J. (2023). *Transport and logistics planning and optimization*. IGI Global.
4. Taroni, F., Biedermann, A., Bozza, S., Garbolino, P., & Aitken, C. (2014). *Bayesian networks for probabilistic inference and decision analysis in forensic science*. Wiley.
5. Kumar, R., Sahu, S., & Bhattacharya, S. (2024). *The pioneering applications of generative AI*. IGI Global.
6. Pathak, P. D., Raut, R., Sakhare, S. R., & Patil, S. (2023). *Generative adversarial networks and deep learning*. CRC Press.
7. Kaggle. (2025, February 26). *NY bus breakdown and delays*. <https://www.kaggle.com/datasets/new-york-city/ny-bus-breakdown-and-delays>.

Отримано 02.06.2025

UDC 004.62

Vladyslav Zetchenko¹, Artem Zadorozhniy²

¹PhD student of the Department of Information Technologies and Software Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zetchenkovlads@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-9925-8628>. **ResearcherID:** ITW-2651-2023

²PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information Technologies and
Software Engineering

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: zaotroy@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3424-7293>. **ResearcherID:** F-6358-2016

CONSTRUCTION OF BAYESIAN TRUST NETWORKS FOR FORECASTING PASSENGER FLOWS OF PUBLIC TRANSPORT USING GENERATIVE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article is devoted to the topical issue of managing congestion in public transport systems. Currently, urban population growth and increased stress on transport infrastructure are being observed, emphasizing urgency of ensuring effective management to enhance passenger comfort and reduce operating costs. In the article, recent research in this field is studied, which employs various approaches, including probabilistic models, generative adversarial networks, and optimization methods.

The article proposes the approach to forecasting and modeling passenger flows in public transportation, based on the integration of Bayesian belief networks—as a tool for probabilistic modeling of dependencies between various factors—and generative artificial intelligence, in particular representatives, including Generative Adversarial Networks and Variational Autoencoders, which allow modeling and simulating potential scenarios in transport systems. This synergy of approaches enables accounting for uncertainty and dynamic changes in the transport network, as well as generating synthetic data in cases where there is a shortage of real measurements—a typical problem in transport modeling.

The study is based on the analysis of empirical data from the period 2015–2018, demonstrating the practical effectiveness of the proposed model. The results confirm the approach's ability to provide more precise load forecasting, respond more promptly to changing conditions, and form adaptive transport management strategies. The proposed tool can be useful for urban planning authorities, transport operators, and developers of intelligent transportation systems. Thus, the article has both scientific and applied value and opens prospects for further research in the field of integrating generative AI with probabilistic analysis in transport modeling. Traffic statistics for the period from 2015 to 2018 are provided.

Keywords: Bayesian trust networks, generative artificial intelligence, public transport, congestion forecasting.

Figures: 2. **Tables:** 2. **References:** 10.

Олег Миколайович Ілляшенко

аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та інноваційних технологій

Міжнародний гуманітарний університет (Одеса, Україна)

E-mail: ctanok@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9184-1733>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗМІРУ ІНСТАЛЯЦІЙНОГО ПАКЕТА І ЧАСУ ЗАПУСКУ МОБІЛЬНОГО ЗАСТОСУНКУ

У статті розглянуто три технологічні стеки розробки мобільних застосунків для ОС Android: Android (Native), Flutter та React Native. Представлено результати експериментального порівняння розміру інсталяційного пакета (APK) та часу запуску (TTID) при cold start сценарії. Дослідження новоствореного проєкту показало, що найменший розмір APK має Flutter з увімкненою оптимізацією R8, найшвидший запуск забезпечує Android (Native) підхід. React Native хоч і поступився за обома параметрами своїм конкурентам, але все одно показав гарні результати які не є підставою для відмови від його використання. Всі підходи можуть бути ефективно застосовані залежно від специфіки проєкту, доступних ресурсів і вимог до продуктивності.

Ключові слова: мобільна розробка; Android; Android (Native); Flutter; React Native; APK; TTID; cold start.

Табл.: 3. Бібл.: 22.

Актуальність теми дослідження. Мобільні пристрої інтегрувалися в наше повсякденне життя, ставши незамінними помічниками в багатьох сферах діяльності. Завдяки компактності та постійній доступності, вони дедалі частіше стають невід'ємною складовою комплексних програмних рішень, доповнюючи чи розширюючи їхні можливості. До найбільш поширених таких пристроїв можна віднести смартфони на базі операційних систем Android і iOS [1]. Згідно зі звітами Statista, кількість завантажень мобільних застосунків у світі щороку зростає [2]. Це зумовлено тим, що вони забезпечують зручний доступ до інформації, різноманітних сервісів, полегшують процес спілкування, інтегруються з IoT (Internet of things) та активно впроваджують ШІ (Штучний інтелект). Завдяки своєму формфактору вони вирішують вузькоспеціалізовані задачі, в яких використання десктопів чи ноутбуків менш зручне, або неможливе.

Постановка проблеми. Розділення ринку між Android і iOS позитивно впливає на їх розвиток і стимулює впровадження нових технологічних рішень. Така конкуренція створює сприятливі умови для інновацій та дозволяє кінцевим користувачам обирати ті продукти, які найкраще відповідають їхнім потребам, завданням чи особистим вподобанням. Водночас це змушує замовників програмного забезпечення піклуватися про користувачів обох платформ, аби гарантувати комфортне користування та якісний сервіс своїх продуктів.

Розробка нових програмних рішень ускладнюється низкою факторів, зокрема відмінностями у програмних та користувацьких інтерфейсах, різними середовищами розробки, а також необхідністю використання різних мов програмування — Kotlin для Android і Swift для iOS [3; 4]. Ці відмінності призводять до необхідності розробки й підтримки окремих проєктів, під кожен з платформ, що у свою чергу призводить до збільшення термінів розробки, дублювання бізнес-логіки, підвищення ймовірності виникнення помилок та додаткового навантаження на управління командою. У зв'язку з цим усе більшої популярності набувають підходи, що дозволяють реалізовувати мобільні застосунки одночасно для кількох платформ із мінімальними витратами ресурсів [5]. Разом із тим, ефективність таких рішень у порівнянні з нативною розробкою з погляду користувача потребує подальшого вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті "Cross-Platform Mobile Development: Comparing React Native and Flutter, and Accessibility in React Native" [6] проаналізовано два популярні кросплатформові фреймворки — React Native і Flutter. Особливу увагу приділено архітектурі, продуктивності та доступності. У висновках вказано, що Flutter забезпечує кращу продуктивність і плавність інтерфейсу, але React Native простіший для розробників знайомих із JavaScript.

У статті "A comparative analysis of the Flutter and React Native framework" [7] досліджено ефективність використання ресурсів мобільних застосунків, створених за допомогою Flutter і React Native. Основну увагу зосереджено на вимірюванні використання віртуальної пам'яті (VIRT), фізичної пам'яті (RES), спільної пам'яті (SHR), процесора (CPU), загального використання пам'яті (MEM).

У статті "A comparative analysis of native vs React Native mobile app development" [8] порівняно нативну розробку та React Native. Створено два ідентичні застосунки, проаналізовано продуктивність (час запуску, використання CPU, пам'яті), UX, витрати та масштабованість. Зазначено, що нативні застосунки мають кращу продуктивність та UX, але React Native дозволяє зменшити час розробки з деякими компромісами в оптимізації.

У статті "React Native evolution, native modules, and best practices" [9] розглянуто розвиток React Native, його архітектурні зміни, інтеграцію нативних модулів та кращі практики розробки. Проаналізовано переваги єдиної кодової бази для обох платформ, а також проблеми продуктивності, які виникають через міст між JavaScript та нативним кодом. Стаття підкреслює важливість балансування між використанням кросплатформових можливостей та нативних модулів для продуктивних завдань.

У статті "Comparison of Flutter and React Native platforms" [10] проведено порівняння Flutter та React Native як кросплатформових фреймворків, для розробки мобільних застосунків. Проаналізовано технічні особливості, популярність, мови програмування, підтримку бібліотек та продуктивність обох платформ. У висновках зазначено, що кожна з технологій має сильні і слабкі сторони: React Native відзначається зрілою екосистемою, та зручністю для розробників знайомих із JavaScript, а Flutter демонструє кращу продуктивність та менший розмір застосунків.

У статті "Comparative study of Android Native and Flutter app development" [11] порівняно нативну розробку та Flutter. Створено два однакові застосунки та проаналізовано їх продуктивність за показником використання CPU, пам'яті, енергоспоживанням та FPS. Результати показали, що нативні застосунки мають кращу оптимізацію та менший розмір інсталяційного пакета, тоді як Flutter демонструє вищий FPS і швидкість розробки.

У статті "Accelerating cross-platform development with Flutter framework" [12] досліджено переваги та недоліки використання Flutter для кросплатформової розробки. Розглянуто архітектуру Flutter, порівняно його з іншими фреймворками (React Native, Xamarin) за швидкістю розробки, продуктивністю та зручністю. У висновках виділено гнучкість Flutter, його переваги (hot reload, єдина кодова база, власний рендеринг) та недоліки (більший розмір застосунків, молодша екосистема).

У статті "A comparative study of Flutter, Kotlin Multiplatform, Jetpack Compose and React Native" [13] порівняно чотири сучасні фреймворки для Android: Flutter, Kotlin Multiplatform, Jetpack Compose та React Native. Проаналізовано їхню продуктивність, підхід до UI, швидкість розробки та інтеграцію з платформою. Висновки показують, що Flutter пропонує кращу кросплатформову узгодженість та продуктивність UI, Jetpack Compose забезпечує найкращу нативну інтеграцію для Android, React Native підходить для швидкого прототипування, а Kotlin Multiplatform добре балансує між спільною бізнес-логікою та нативним UI.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість досліджень, залишається недостатньо вивченим вплив використання різних фреймворків на розмір інсталяційного пакета (APK) та час запуску застосунку (TTID) в реальних умовах експлуатації. Зокрема, у наявних публікаціях не враховано впровадження нової архітектури React Native (TurboModules, Fabric, JavaScript Interface, далі — JSI), яка з'явилася у версії 0.70 (вересень 2022). Також поза увагою залишився Impeller engine [14], який з релізу Flutter 3.27 (грудень 2024) використовується за замовчуванням

не лише для iOS, а й для Android. Зважаючи на потенційний вплив цих змін на продуктивність, розмір пакета та час початкового запуску застосунку, зазначене питання потребує окремого емпіричного дослідження.

Мета дослідження. Порівняння розміру інсталяційного пакета, та часу запуску мобільного застосунку для Android, розробленого з використанням нативного підходу, а також React Native та Flutter. Це дозволить оцінити, наскільки ефективно оптимізовані кросплатформові рішення порівняно з нативною розробкою та виявити потенційні обмеження їх використання.

Виклад основного матеріалу.

Розмір APK. Зменшення розміру інсталяційного пакета є надзвичайно важливим для деяких ринків, оскільки напряму впливає на швидкість завантаження застосунку в умовах повільного інтернет-з'єднання, допомагає заощаджувати трафік при дорогих тарифах і суттєво підвищує ймовірність регулярного оновлення застосунку користувачами.

Android (Native) застосунок має компактний розмір завдяки відсутності додаткових шарів, який можна ще зменшити за допомогою R8 інструменту [15], котрий прийшов на заміну ProGuard і призначений для мініфікації та оптимізації коду. Він видаляє непотрібний код, проводить оптимізацію і перейменовує класи, методи та змінні на коротші назви. Також виконує обфускацію, що ускладнює читання коду сторонніми особами, і цим покращує безпеку та захищає інтелектуальну власність. Крім того, R8 дозволяє видаляти невикористані ресурси, які можуть з'являтися і накопичуватися під час розробки. Попри перелічені переваги, існує й певний недолік — для забезпечення коректної роботи проєкту необхідно виконувати додаткові налаштування, які залежать від використовуваних бібліотек, що може збільшити витрати часу на інтеграцію.

В основі Flutter лежить власний engine, який відповідає за рендеринг інтерфейсу, виконання коду на Dart та взаємодію з нативними API. Flutter відмальовує UI елементи використовуючи графічну бібліотеку Skia або Impeller engine, залежно від версії, пристрою та конфігурації проєкту. Impeller прийшов на заміну Skia бо забезпечує стабільнішу продуктивність рендерингу, ефективніше використовує GPU та усуває затримки, пов'язані з runtime-компіляцією шейдерів. Паралельно з цим існує Dart VM, яка дозволяє запускати Dart-код в одному з двох режимів: JIT (компіляція "на льоту" для Hot Reload) та AOT (компіляція наперед для максимальної оптимізації). Усі ці компоненти будуть додані в APK файл у вигляді libflutter.so.

React Native складається з двох основних частин: JavaScript шару, де працює логіка додатка та компоненти React, і нативного шару, який відповідає за відображення реальних UI-елементів. Обидві частини взаємодіють між собою за допомогою спеціального механізму, який залежить від використовуваної архітектури. JSI з'явився в новій архітектурі і прийшов на зміну Bridge, для вирішення обмежень старого підходу. Для виконання JavaScript використовується JavaScriptCore або Hermes [16], який забезпечує кращу продуктивність, пришвидшує запуск додатка (особливо на Android) та зменшує споживання пам'яті. Під час збірки застосунку з Hermes JavaScript-код попередньо компілюється у байт-код, що скорочує розмір JS bundle та знижує навантаження при старті. Разом з тим, сам Hermes додається в APK у вигляді libhermes.so файлу, що може збільшити розмір інсталяційного пакета, однак виграш у швидкодії часто це компенсує, а у випадку з новою архітектурою є необхідною умовою. В подальших дослідженнях доцільно використовувати нову архітектуру, адже вона має стати основним підходом у майбутньому і широко використовуватиметься в нових проєктах, або при оновленні старих.

Відкрита модель Android сприяла активному використанню системи багатьма виробниками, що зумовило появу значної кількості пристроїв із різноманітними апаратними конфігураціями. Починаючи із серпня 2021 року, для публікації нових додатків в Google

Play потрібно використовувати Android App Bundle (AAB) формат який прийшов на заміну APK для оптимізації такої фрагментації. AAB містить набір ресурсів і кодів для різних пристроїв: різні архітектури процесора, екрани, мови. Після завантаження в Google Play він буде розпакований і на його основі будуть згенеровані й підписані оптимізовані APK, які і будуть використовуватися для встановлення/оновлення застосунку на пристрої користувача. Такий механізм дозволяє зменшити розмір інсталяційного пакета завдяки використанню тільки необхідних компонентів для конкретного пристрою.

У роботі здійснено порівняльний аналіз розміру інсталяційного пакета, створеного із використанням різних технологічних стеків для ОС Android. Оскільки Google Play генерує оптимізовані APK для конкретних пристроїв, доцільно виконувати порівняння на основі одного ABI (Application Binary Interface). ARM64-v8a (64-бітних ARM-процесорів) наразі є найбільш поширеним серед Android-пристроїв згідно зі статистикою Google. Додатково для точності експерименту обмежимо збірку лише однією щільністю екрана — xxxhdpi. Для реалізації цього підходу були внесені відповідні налаштування splits.abi та splits.density до файлу build.gradle.kts.

Під час експерименту використовуватимуться такі версії середовищ: Flutter 3.29.2 (channel stable), React Native 0.78.0 з увімкненою новою архітектурою та Hermes, Android SDK рівня API 35 (Android 15), Gradle 8.10.2, AGP 8.8.2. Застосунки збиратимуться у release-режимі з увімкненням R8, а також у варіантах без нього для порівняння.

Для формалізації отриманих результатів найменший розмір APK (табл. 1) буде використано як референтне значення, що використовується як база для розрахунку відсоткового відхилення за формулою (1):

$$\Delta\% = \left(\frac{S - S_{\min}}{S_{\min}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

де S – розмір APK (MiB), $S_{\min}$ – найменший розмір APK (MiB), $\Delta\%$ – відсоткове відхилення.

Таблиця 1 – Порівняння розмірів APK файлів (ARM64-v8a, xxxhdpi)

Платформа	R8 Увімкнено	Розмір APK (MiB)	Відхилення (%)
Android (Native)	так	7,11	7,4
Android (Native)	ні	11,33	71,15
Flutter	так	6,62	0,0
Flutter	ні	8,22	24,17
React Native	так	13,12	98,19
React Native	ні	15,36	132,02

Джерело: складено автором.

Проведений експеримент показав, що розмір інсталяційного пакета залежить не лише від обраної технології, але й від налаштувань збірки та інструментів оптимізації. Найменший розмір APK було отримано для Flutter з увімкненням R8, що навіть менше ніж у випадку нативного Android застосунку з активованим R8. На перший погляд, такий результат може виглядати неочікуваним, адже Flutter містить у собі власний engine, що додається в інсталяційний пакет, однак низка факторів дозволяє ефективно оптимізувати розмір базового проекту. Водночас така перевага поступово нівелюється в міру масштабування застосунку. Додавання сторонніх плагінів (Firebase, Google Maps, Camera API тощо) призводить до швидшого зростання розміру, ніж у нативному Android, через інтеграцію додаткових нативних бібліотек та платформених каналів. За неформальними спостереженнями спільноти розробників, приріст розміру APK у Flutter може бути майже вдвічі швидшим, ніж у Kotlin-проектах за умови однакової кількості залежностей. React Native продемонстрував найбільший розмір пакета серед усіх рішень, що зумовлено специфічною архітектурою платформи, зокрема необхідністю додавання Hermes та місткого JS bundle.

Якщо збереження компактного інсталяційного пакета в пріоритеті, найкращим рішенням буде Android (Native). Якщо ж цей параметр не є визначальним для проєкту, можна застосовувати будь-яку з розглянутих технологій, контролюючи збільшення розміру шляхом додавання лише необхідних залежностей.

App startup time. Швидкість запуску застосунку впливає на перше враження користувача та є складовою його загального задоволення програмним продуктом. Цей параметр може бути критично важливим для окремих категорій застосунків. Наприклад, для камери, якщо старт займає занадто багато часу, користувач ризикує втратити можливість зробити потрібний кадр у вирішальний момент. У мобільних застосунках є дві важливі метрики: TTID (time to initial display) і TTFD (time to fully drawn) [17].

TTID - це час від натискання на іконку застосунку, або від запуску через intent (на Android) до відображення першого кадру. У порівнянні з нативними застосунками у кро-сплатформових рішеннях є додаткові етапи під час ініціалізації, що потребує більше часу. У Flutter додаються: ініціалізація Flutter engine, запуск Dart VM, виклик runApp() і побудова widget tree. У React Native додаються: ініціалізація JS engine, парсинг та виконання JS bundle, виконання AppRegistry.registerComponent(), додаткові операції пов'язані з новою архітектурою.

Згідно з документацією ОС Android, запуск застосунку може відбуватися по одному з трьох сценаріїв: cold start (додаток завантажується з нуля), warm start (додаток у пам'яті, але activity було знищено), hot start (activity була призупинена, але вона в пам'яті).

Доцільним видається проведення порівняльного аналізу показника TTID при cold start із використанням різних технологічних стеків для ОС Android, оскільки цей сценарій найдовший із трьох можливих. Для цього в методі onCreate() класу Application було зафіксовано початковий час у мілісекундах. Після повного відображення першого екрану, зафіксуємо фінальний час та обчислимо різницю. Для отримання статистично надійних висновків проведено 50 замірів [18]. При цьому час витрачений системою до виклику onCreate(), класу Application, у розрахунках буде проігноровано. Таким чином отримаємо орієнтовний TTID для кожного технологічного стека. Цей підхід дозволить нам оцінити вплив різних технологій на швидкість запуску мобільного застосунку та зробити висновки щодо їхньої ефективності в контексті cold start.

Для обробки отриманих даних було застосовано мову програмування Python із залученням двох основних бібліотек: NumPy [19] та SciPy [20]. Бібліотека NumPy застосовувалась для базових числових операцій, таких як обчислення середнього значення, медіани, стандартного відхилення, мінімуму та максимуму. Для виконання статистичних тестів, зокрема розрахунку міжквартильного діапазону (IQR), перевірки нормальності розподілу за допомогою тесту Shapiro-Wilk, а також перевірки статистичної значущості між вибірками, використовувалась бібліотека SciPy (модуль stats).

Таблиця 2 – Статистичне порівняння TTID (Cold Start), мс

Показник	Android (Native)	Flutter	React Native
Середнє	123,42	187,92	235,14
Медіана	123,0	187,0	234,0
Стандартне відхилення	2,66	5,45	5,57
Мінімум	119	180	223
Максимум	130	206	248
IQR	3,5	6,0	6,5

Джерело: складено автором.

Як свідчать дані, наведені в табл. 2, спостерігається відмінність у показниках TTID (Cold Start) між досліджуваними підходами. Для обґрунтованого вибору статистичного методу порівняння необхідно попередньо перевірити, чи підпорядковуються вибірки нормальному розподілу. З цією метою було застосовано тест Shapiro-Wilk, результати якого подано в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати перевірки на нормальність (Shapiro–Wilk)

Показник	Android (Native)	Flutter	React Native
p-значення	6.261698e-02	2.085780e-04	1.197405e-01
Нормальний розподіл	так	ні	так

Джерело: складено автором.

Оскільки принаймні одна з вибірок не має нормального розподілу, для порівняння груп було застосовано непараметричний критерій Kruskal-Wallis. Отримане p-значення (1.600934e-29) свідчить про статистично значущу різницю між реалізаціями в контексті ефективності TTID (Cold Start). Водночас отримані відмінності не є критичними з практичного погляду.

Проведений експеримент показав, що найшвидший запуск у Android (Native), але і кросплатформові рішення не критично поступаються в цьому показнику, і підтверджується можливість їх використання без істотного впливу на досвід користувача при старті. Для тесту був використаний середньобюджетний смартфон Google Pixel 3a на Android 12, що класифікується як застарілий пристрій [21] бо вже припинилася підтримка оновлень системи безпеки, однак технічно залишається сумісним із сучасними технологіями, зокрема підтримує Impeller у Flutter. Вибір застарілого смартфона був навмисним, для того щоб оцінити цей показник на слабкому за сучасними мірками процесорі, а саме Qualcomm Snapdragon 670 [22].

Слід зауважити, що на більш сучасних і продуктивних смартфонах час запуску додатків, ймовірно, буде ще кращим. Потужніші процесори, швидша оперативна пам'ять та покращена оптимізація нових версій Android сприяють зменшенню затримок при cold start. Водночас результати, отримані на застарілому пристрої, свідчать про те, що навіть за несприятливих умов показники запуску залишаються у межах прийнятного. Це підтверджує, що кросплатформові фреймворки можуть бути ефективно використані для розробки застосунків, орієнтованих на ринки з високим відсотком користувачів застарілих або бюджетних пристроїв, зберігаючи при цьому належний рівень користувацького досвіду.

TTFD - час до повної готовності UI, з яким користувач може почати взаємодіяти. Він складається з TTID і часу, що необхідний для повного завантаження та відображення даних. У межах цього дослідження TTFD не використовувався як порівняльна метрика через високу залежність від зовнішніх чинників (швидкість інтернет-з'єднання, затримки з боку сервера, алгоритми кешування і обробки даних). У клієнт-серверних застосунках затримки, пов'язані з мережею або серверною логікою, можуть нівелювати архітектурні переваги фреймворку. Крім того, в усіх розглянутих технологічних рішеннях існує можливість винесення важких операцій до нативного шару — наприклад, за допомогою Kotlin, Swift або C++ - що дає змогу здійснити оптимізацію часу повного завантаження незалежно від фреймворку.

Висновки. У межах проведеного дослідження було порівняно три технології розробки мобільних додатків для ОС Android: Android (Native), Flutter та React Native за показниками розміру APK і часу запуску (TTID) при cold start.

Найменший розмір APK вдалося отримати при використанні Flutter з увімкненою оптимізацією R8, що навіть менше, ніж у Android (Native). Це свідчить про високий рівень базової оптимізації Flutter, хоча зі зростанням складності проєкту його перевага по-

ступово нівелюється через архітектурні особливості при залежності від додаткових бібліотек. React Native, у свою чергу, показав найбільший розмір пакета, що пояснюється особливостями архітектури, зокрема необхідністю включення Hermes, JavaScript bundle.

Найшвидший запуск застосунку продемонстрував Android (Native), однак як Flutter, так і React Native забезпечили достатньо низькі значення TTID, значно нижчі за критичні межі, визначені в документації ОС Android. Такий час не спричинятиме суттєвого зниження користувацького досвіду, навіть на застарілих пристроях.

Незважаючи на те, що Android (Native) зберігає за собою певні переваги з погляду продуктивності, Flutter та React Native відкривають значні можливості для прискореної розробки і підтримки існуючих проєктів завдяки використанню єдиної кодової бази. За умови чіткого розуміння їхніх архітектурних обмежень та правильного застосування їхніх можливостей, ці фреймворки дозволяють створювати якісні та ефективні мобільні застосунки. Варто зазначити, що розробники кросплатформових рішень активно працюють над оптимізацією своїх технологій, що сприяє зростанню їх популярності серед розробників.

Отже, при виборі стека, для розробки мобільного застосунку, доцільно враховувати не лише технічні характеристики, а й контекст проєкту, доступність ресурсів для розробки, цільову аудиторію, вимоги до розміру застосунку, швидкість виходу на ринок та подальшу підтримку.

Список використаних джерел

1. StatCounter. (n.d.). *Operating system market share worldwide*. <https://gs.statcounter.com/os-market-share>.
2. Statista. (б. д.). *Number of mobile app downloads worldwide from 2016 to 2023*. <https://www.statista.com/statistics/271644/worldwide-free-and-paid-mobile-app-store-downloads>.
3. Apple. (n.d.). *Develop apps for Apple platforms*. Apple Developer Documentation. <https://developer.apple.com/tutorials/app-dev-training>.
4. Android Developers. (n.d.). *Build your first app | Get started with Android*. <https://developer.android.com/get-started/overview>.
5. JetBrains. (n.d.). *Popular cross-platform app development frameworks*. <https://www.jetbrains.com/help/kotlin-multiplatform-dev/cross-platform-frameworks.html#popular-cross-platform-app-development-frameworks>.
6. Goli, V. R. (2023). Cross-platform mobile development: Comparing React Native and Flutter, and accessibility in React Native. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.15680/ijirccce.2023.1103002>.
7. Markowski, M., & Smółka, J. (2023). A comparative analysis of the Flutter and React Native frameworks. *Journal of Computer Sciences Institute*, 29, 346–351. <https://doi.org/10.35784/jcsi.3794>.
8. Ramachandrappa, N. C. (2024). A comparative analysis of native vs React Native mobile app development. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 72(9), 33–37. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V72I9P110>.
9. Goli, V. R. (2021). React Native evolution, native modules, and best practices. *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, 12(2), 67–75. https://doi.org/10.34218/IJCET_12_02_009.
10. Gülcüoğlu, A., Seyhan, R., Berk Ustun, A. (2021). Comparison of Flutter and React Native platforms. *Internet Applications and Management*, 12(2), 27–36. <https://doi.org/10.34231/iuyd.888243>.
11. Hussain, H., Khan, K., Farooqui, F., Arain, Q. A., & Siddiqui, I. F. (2021). Comparative study of Android Native and Flutter app development. *Proceedings of the 13th International Conference on Internet (ICONI)*, 99–102. KSII. <https://www.researchgate.net/publication/361208165>.
12. Sattar, A. M., Soni, P., Ranjan, M. K., Kumar, A., Sahu, C., Saxena, S., & Chaudhari, P. (2023). Accelerating cross-platform development with Flutter framework. *Journal of Open Source Developments*, 10(2), 1–11. <http://dx.doi.org/10.37591/joosd.v10i2.580>.

13. Kumar, R. (2023). Evaluating modern Android framework: A comparative study of Flutter, Kotlin Multiplatform, Jetpack Compose and React Native. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 9(5), 1–9. <https://doi.org/10.55041/IJSREM48732>.
14. Flutter. (n.d.). *Flutter architectural overview*. <https://docs.flutter.dev/resources/architectural-overview>.
15. Android Developers. (n.d.). *Enable app optimization*. <https://developer.android.com/topic/performance/app-optimization/enable-app-optimization>.
16. React Native. (n.d.). *JavaScript environment – React Native*. <https://reactnative.dev/docs/javascript-environment>.
17. Android Developers. (n.d.). *App startup time*. <https://developer.android.com/topic/performance/vitals/launch-time>.
18. Illiashenko, O. (2025). *3amipu TTID (Cold Start), mc* [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15774969>.
19. NumPy. (n.d.). NumPy. <https://numpy.org>.
20. SciPy. (n.d.). SciPy. <https://scipy.org>.
21. Android Update Tracker. (n.d.). *Google Pixel 3a update history*. <https://www.androidupdatetracker.com/p/google-pixel-3a>.
22. NanoReview. (n.d.). *SoC rating list | Smartphone Processors Ranking*. <https://nanoreview.net/en/soc-list/rating>.

References

1. StatCounter. (n.d.). *Operating system market share worldwide*. <https://gs.statcounter.com/os-market-share>.
2. Statista. (6. д.). *Number of mobile app downloads worldwide from 2016 to 2023*. <https://www.statista.com/statistics/271644/worldwide-free-and-paid-mobile-app-store-downloads>.
3. Apple. (n.d.). *Develop apps for Apple platforms*. Apple Developer Documentation. <https://developer.apple.com/tutorials/app-dev-training>.
4. Android Developers. (n.d.). *Build your first app | Get started with Android*. <https://developer.android.com/get-started/overview>.
5. JetBrains. (n.d.). *Popular cross-platform app development frameworks*. <https://www.jetbrains.com/help/kotlin-multiplatform-dev/cross-platform-frameworks.html#popular-cross-platform-app-development-frameworks>.
6. Goli, V. R. (2023). Cross-platform mobile development: Comparing React Native and Flutter, and accessibility in React Native. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 11(3). <https://doi.org/10.15680/ijirccc.2023.1103002>.
7. Markowski, M., & Smółka, J. (2023). A comparative analysis of the Flutter and React Native frameworks. *Journal of Computer Sciences Institute*, 29, 346–351. <https://doi.org/10.35784/jcsi.3794>.
8. Ramachandrappa, N. C. (2024). A comparative analysis of native vs React Native mobile app development. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 72(9), 33–37. <https://doi.org/10.14445/22312803/IJCTT-V72I9P110>.
9. Goli, V. R. (2021). React Native evolution, native modules, and best practices. *International Journal of Computer Engineering and Technology (IJCET)*, 12(2), 67–75. https://doi.org/10.34218/IJCET_12_02_009.
10. Gülcüoğlu, A., Seyhan, R., Berk Ustun, A. (2021). Comparison of Flutter and React Native platforms. *Internet Applications and Management*, 12(2), 27–36. <https://doi.org/10.34231/iuyd.888243>.
11. Hussain, H., Khan, K., Farooqui, F., Arain, Q. A., & Siddiqui, I. F. (2021). Comparative study of Android Native and Flutter app development. *Proceedings of the 13th International Conference on Internet (ICONI)*, 99–102. *KSII*. <https://www.researchgate.net/publication/361208165>.
12. Sattar, A. M., Soni, P., Ranjan, M. K., Kumar, A., Sahu, C., Saxena, S., & Chaudhari, P. (2023). Accelerating cross-platform development with Flutter framework. *Journal of Open Source Developments*, 10(2), 1–11. <http://dx.doi.org/10.37591/joosd.v10i2.580>.
13. Kumar, R. (2023). Evaluating modern Android framework: A comparative study of Flutter, Kotlin Multiplatform, Jetpack Compose and React Native. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 9(5), 1–9. <https://doi.org/10.55041/IJSREM48732>.
14. Flutter. (n.d.). *Flutter architectural overview*. <https://docs.flutter.dev/resources/architectural-overview>.

15. Android Developers. (n.d.). *Enable app optimization*. <https://developer.android.com/topic/performance/app-optimization/enable-app-optimization>.
16. React Native. (n.d.). *JavaScript environment – React Native*. <https://reactnative.dev/docs/javascript-environment>.
17. Android Developers. (n.d.). *App startup time*. <https://developer.android.com/topic/performance/vitals/launch-time>.
18. Illiashenko, O. (2025). *Заміру TTID (Cold Start), мс* [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15774969>.
19. NumPy. (n.d.). NumPy. <https://numpy.org>.
20. SciPy. (n.d.). SciPy. <https://scipy.org>.
21. Android Update Tracker. (n.d.). *Google Pixel 3a update history*. <https://www.androidupdatetracker.com/p/google-pixel-3a>.
22. NanoReview. (n.d.). *SoC rating list | Smartphone Processors Ranking*. <https://nanoreview.net/en/soc-list/rating>.

Отримано 10.06.2025

UDC 004.415.2

Illiashenko Oleh¹

¹PhD student, Faculty of Cybersecurity, software engineering, and computer science
International Humanitarian University (Odessa, Ukraine)
E-mail: ctanok@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9184-1733>

COMPARATIVE ANALYSIS OF INSTALLATION PACKAGE SIZE AND STARTUP TIME OF A MOBILE APPLICATION

This article explores three technological stacks for mobile application development on the Android operating system: Android (Native), Flutter, and React Native. It presents the results of an experimental comparison focusing on two important parameters that directly influence the user's experience: the size of the installation package (APK) and the time to initial display (TTID) in a cold start scenario. To ensure objective comparison, identical conditions were used: the same processor architecture (ARM64-v8a), the same screen density (xxxhdpi), and the same build settings (release mode). The study of a newly created project showed that the smallest APK size was achieved using Flutter with the R8 code optimizer enabled. This indicates a high degree of default optimization and the absence of numerous dependencies at the initial stage. Android (Native) showed the best results in launch time (TTID), due to the lack of additional initialization layers. Although React Native lagged behind its competitors in both parameters, it still demonstrated solid performance that does not warrant its exclusion from consideration. TTID was measured on a mid-range smartphone, Google Pixel 3a, to evaluate this parameter on a processor that is considered weak by modern standards — the Snapdragon 670. The obtained results confirmed the feasibility of using cross-platform frameworks even on outdated devices without a significant loss in user experience quality. The article concludes that the choice of development stack should depend not only on technical characteristics but also on project specifics, team expertise, development timelines, maintenance demands, and desired time-to-market. Therefore, each of the reviewed approaches can be used under suitable conditions and is capable of providing a comfortable and stable user experience.

Keywords: mobile development; Android; Android (Native); Flutter; React Native; APK; TTID; cold start.

Table: 3. References: 22.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-284-293](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-284-293)

УДК 004.896:69.003.13

Микита Андрійович Коваленко¹, Марія Михайлівна Войцеховська²¹аспірант, здобувач наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 122

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: kovalenkomyk6@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1223-9638>²доктор філософії, доцент кафедри інформаційних технологій і програмної інженерії

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1711-101X>

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРЕ-БУДІВНИЦТВА: ОГЛЯД ІНСТРУМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ПРАКТИЧНИХ ЗАСТОСУНКІВ У ГАЛУЗІ

У статті розглянуто потенціал застосування штучного інтелекту (ШІ) та комп'ютерного зору на етапі підготовки до будівництва, зокрема в процесах автоматизованого підрахунку матеріалів (Quantity Takeoff) та аналізу креслень. Проведено огляд сучасних інструментів (Togal, BlueBeam, PlanSwift тощо) та їхніх функціональних можливостей. Запропоновано архітектуру системи для автоматизованої обробки креслень із використанням моделей сегментації та розпізнавання об'єктів. Окреслено переваги, обмеження та шляхи подальшої інтеграції ШІ в цифрове будівництво.

Ключові слова: будівництво; автоматизація; комп'ютерний зір; передбудівельний етап; Takeoff; пошук інформації.

Рис.: 3. Бібл.: 10. Табл.: 2.

Актуальність теми дослідження. Будівельна галузь є однією з найповільніших у впровадженні цифрових інновацій, що гальмує її ефективність на ключовому етапі — підготовці до будівництва. Саме в цей період відбувається аналіз креслень, розрахунок матеріалів та формування кошторису, що напряму впливає на вартість і тривалість реалізації проєкту. Станом на 2025 рік значна частина цих процесів усе ще виконується вручну або напівавтоматизовано, що призводить до втрати точності, часу та ресурсів. Зростаючий обсяг технічної документації вимагає нових підходів, які здатні забезпечити швидкий та надійний аналіз креслень. У зв'язку з цим інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та комп'ютерного зору (CV) стає критично важливою для оптимізації процесів кількісного розрахунку (QTO), що є основою для прийняття управлінських і фінансових рішень у будівництві.

Постановка проблеми. Будівельна галузь традиційно залежить від ручних процесів і фрагментованих комунікацій, що значно ускладнює забезпечення ефективності, контролю витрат та точності на етапі підготовки до будівництва. Такі завдання, як підрахунок кількості матеріалів, аналіз креслень та перевірка дизайну, залишаються трудомісткими та схильними до помилок, адже вимагають значної участі людини. Це призводить до ризиків затримок, підвищення витрат та необхідності переробок [1]. Попри впровадження цифрових інструментів, таких як інформаційне моделювання будівель (BIM) та платформи управління проєктами, суттєвою проблемою залишається недостатня автоматизація ключових процесів, зокрема використання технологій штучного інтелекту (ШІ) та комп'ютерного зору [2]. Сучасний розвиток ШІ та комп'ютерний зір має потенціал трансформувати етап підготовки до будівництва, автоматизуючи завдання, які раніше виконувалися вручну. Наприклад, інструменти на основі ШІ, такі як Togal.AI, Bluebeam, On-Screen Takeoff та PlanSwift, використовують алгоритми машинного навчання для вилучення та інтерпретації інформації з PDF-документів будівельних креслень, що дозволяє швидко і точно виконувати розрахунок матеріалів [1; 3]. Ці рішення значно скорочують час і зусилля, необхідні для виконання таких завдань, забезпечуючи точність, яка сягає понад 98 % [4]. Однак автоматизація не обмежується лише обробкою геометричних даних. Значні досягнення спостерігаються в розпізнаванні тексту, символів та патернів на кресленнях і в документації. Інструменти, такі як Togal.AI, здатні автоматично розпізнавати символи на кресленнях, класифікувати їх та інтегрувати

отриману інформацію у процес кількісних розрахунків [5]. Розпізнавання тексту та патернів має важливе значення для підвищення точності підрахунку обсягу матеріалів. Інструменти розпізнавання тексту дозволяють ідентифікувати ключові елементи креслень, наприклад двері, вікна або стіни, та інтегрувати ці дані для створення точних кошторисів [6]. Використання таких технологій мінімізує ризики людських помилок, які часто виникають при ручному аналізі. Quantity Takeoff, або QTO, — це процес визначення кількості матеріалів або обсягів робіт, необхідних для реалізації будівельного проєкту. Цей процес є ключовим етапом у складанні кошторису, оскільки він забезпечує базу для розрахунку витрат на матеріали, робочу силу, обладнання та інші ресурси, необхідні для завершення проєкту [1]. Традиційно QTO виконувався вручну на основі двовимірних креслень, таких як плани поверхів, розрізи та фасади. Це вимагало значних зусиль, а якість результатів критично залежна від людських помилок, через що точність та ефективність процесу значно знижувались [2]. Інноваційні рішення, що використовують ШІ і комп'ютерний зір, забезпечують більш високий рівень точності в підрахунку кількості матеріалів, скорочують час виконання робіт та мінімізують ризики помилок. Ці технології здатні виконувати аналіз креслень, розпізнавати елементи будівлі та їх характеристики, а також автоматично генерувати звіти про кількість матеріалів [4]. Таким чином, Quantity Takeoff є важливим компонентом передбудівельного етапу, що сприяє ефективному плануванню та виконанню проєктів. Завдяки сучасним технологіям, таким як ШІ, автоматизація розпізнавання тексту та символів, цей процес стає більш ефективним, точним і менш трудомістким, що відкриває нові можливості для оптимізації будівельних робіт. Попри велику кількість програмних рішень, питання точності залишаються відкритими. Значна частина сучасних інструментів працює зі спрощеними наборами символів або потребує попереднього налаштування під конкретні креслення. Водночас новітні дослідження демонструють ефективність використання глибоких згорткових мереж, таких як YOLOv7 та Faster R-CNN, для аналізу PDF-креслень з великою кількістю об'єктів. У роботі [7] представлено архітектуру системи, що дозволяє виявляти символи, включаючи двері, сантехніку та паркувальні місця, з точністю понад 95 % на кресленнях, наданих промисловими партнерами. Це підтверджує доцільність подальшого розвитку напрямів обробки реальних креслень із високою щільністю графічної інформації.

Сучасний стан проблеми. Національна академія будівництва [1] (2024) висвітлює трансформаційний потенціал штучного інтелекту для проведення QTO. Д. Вайтман та Р. Реймонд підкреслюють, що ШІ здатний автоматизувати традиційно ручні та схильні до помилок процеси. Інструменти, такі як TotalAI, використовують алгоритми машинного навчання для аналізу будівельних креслень і вилучення відповідних обсягів ресурсів, що підвищує точність і ефективність роботи. Дослідження також відзначає, що впровадження ШІ сприяє покращенню співпраці між учасниками проєкту завдяки прозорості даних та мінімізації ризиків допущення помилок [1]. Xichen Chen та ін. (2021) [2] провели систематичний огляд інновацій у будівництві, класифікуючи їх за впливом на ефективність проєктів, управління витратами та стійкість. Автори відзначають значний потенціал ШІ та машинного навчання для оптимізації процесів QTO. Зокрема, ці технології дозволяють автоматизувати повторювані завдання, мінімізувати помилки та забезпечити прогнозування аналітики для кращого розподілу ресурсів. Водночас дослідження вказує на бар'єри, такі як високі витрати на впровадження, недостатня кількість кваліфікованих фахівців та опір інноваціям у галузі [2]. Окрім вищезгаданих викликів, дослідження Karan et al. (2021) також акцентує на проблемі браку структурованої вихідної інформації на ранніх етапах оцінки вартості. Це ускладнює процес кількісного розрахунку (QTO) і підвищує невизначеність. Автори пропонують моделювання знань експертів за допомогою правил типу IF–THEN для автоматизації ухвалення рішень щодо вибору методів

будівництва, одиниць виміру та визначення вартості [4]. Зокрема, TogaI.AI може виконувати розпізнавання патернів та об'єктів у кресленнях у форматі PDF, значно скорочуючи терміни виконання завдань. Однак автори зазначають, що інтеграція цих інструментів з існуючими системами управління проєктами все ще залишається викликом [5]. Shengxian Tang, Hexiong Liu, Manea Almatred та ін. (2022) [3] запропонували підхід, який поєднує алгоритми обробки природної мови (NLP) та методи на основі правил для автоматизації вишукування інформації з текстових описів робіт. Наведений підхід дозволяє скоротити трудовитрати та підвищити точність обчислень. Автори також обговорюють потенціал ІІІ для підвищення сумісності між BIM-інструментами та програмами для QTO, вирішуючи проблеми обміну даними та забезпечення їхньої узгодженості [8]. Karan та ін. (2021) [4] досліджують застосування ІІІ для автоматизації QTO, зосереджуючись на випадках використання, які демонструють покращення швидкості та точності процесів. У дослідженні відзначено ключову роль згорткових нейронних мереж (CNN) і трансформерів у розпізнаванні будівельних елементів на кресленнях. Автори також підкреслюють важливість якісних навчальних наборів даних для покращення роботи моделей. Водночас вони наголошують, що виклики, пов'язані з неоднозначністю даних і масштабованістю моделей, залишаються актуальними [5]. Розглянуті дослідження ілюструють вирішальну роль ІІІ та автоматизації у трансформації процесів QTO у будівельній галузі. Традиційні методи, що характеризуються низькою ефективністю та схильністю до помилок, замінюються інноваційними підходами, які забезпечують точність, ефективність і покращують співпрацю між учасниками проєктів. Однак для повного розкриття потенціалу цих технологій необхідно вирішити проблеми інтеграції, підвищити рівень навичок фахівців і стимулювати впровадження новітніх інструментів.

Мета статті. Метою статті є систематизація знань про існуючі інструменти автоматизації на етапі підготовки до будівництва, зокрема процесів Quantity Takeoff, та окреслення технічних і методологічних проблем, пов'язаних із впровадженням штучного інтелекту та комп'ютерного зору. Крім того, автори ставлять за мету представити власний підхід до автоматизованого аналізу креслень, базуючись на модульній архітектурі сегментації, класифікації та інтеграції з хмарними середовищами. Це дозволить покращити точність обробки креслень і запропонувати реалістичний варіант вирішення ключових обмежень у сфері цифрової трансформації будівництва.

Виклад основного матеріалу.

Огляд рішень. Ручне виконання кількісного розрахунку є тривалим, виснажливим та повторюваним процесом, який також схильний до численних помилок. Для підвищення точності та ефективності цього завдання за останні роки було створено низку програмних рішень, які частково автоматизують процес. Ці інструменти не лише скорочують час на виконання розрахунків, але й поступово вдосконалюються, інтегруючи інноваційні функції, що відповідають сучасним потребам. Основні можливості поширених рішень (TogaI, BlueBeam, OnScreen та PlanSwift), їх переваги та обмеження, які заважають досягненню повної автоматизації, докладно розглянуто в цьому розділі. Функціональні особливості вищезгаданих інструментів представлені детально у звіті Національної Академії Будівництва [1]. Аналіз наведених даних показує, що рішення TogaI має найбільш широкий набір можливостей серед представлених інструментів. TogaI підтримує передові функції, такі як пошук зображень за допомогою штучного інтелекту (AI Image Search), генерацію тексту за допомогою TogaI CHAT, автоматичне розпізнавання назв креслень, внутрішню та зовнішню співпрацю в реальному часі, а також управління дозволами користувачів. Рішення BlueBeam також включає низку важливих функцій, таких як текстовий та графічний пошук, можливість роботи з криволінійними об'єктами, експорт із фільтрацією, накладання креслень і підтримку різних одиниць вимірювання. Однак воно

не підтримує хмарні технології та не має функцій для повноцінної внутрішньої та зовнішньої співпраці в реальному часі. Інструменти OnScreen та PlanSwift мають більш обмежений функціонал порівняно з Togonal і BlueBeam. Зокрема, OnScreen не підтримує більшості сучасних функцій, крім базових, таких як вирізання областей, заливання та експорт результатів. PlanSwift має ширший функціонал порівняно з OnScreen, зокрема підтримує інструменти розбиття, об'єднання, автонайменування креслень, персональну бібліотеку та управління ревізіями креслень. Водночас обидва рішення значно поступаються Togonal за ступенем автоматизації. Таким чином, аналізована таблиця підтверджує, що, незважаючи на значні досягнення в автоматизації процесів кількісного розрахунку, наявні інструменти досі мають обмеження, які заважають досягти повної автоматизації, що демонструється різницею у функціональних можливостях між представленими рішеннями [1; 5; 6; 9]. Додатково, Karan et al. [4] запропонували порівняльний аналіз дев'яти поширених програм для QTO, серед яких — STACK, PlanSwift, Bluebeam, Countfire та інші. Вони узагальнили ключові функції, як-от автоматичне виявлення об'єктів, 1D/2D/3D-вимірювання, підтримка багат шарових креслень і експорт у форматах, сумісних із Excel. Водночас навіть такі інструменти не позбавляють потреби у знаннях користувача щодо умовних позначень і термінології креслень, що обмежує рівень автоматизації.

Упродовж останніх років розроблено велику кількість програмних засобів для автоматизації QTO. Крім вже згаданих інструментів, ефективно використовуються STACK, Countfire, PrebuiltML, On Center, Square, eTakeoff Dimension та Buildee. Ці рішення мають функції виявлення об'єктів, підрахунку вбудованих елементів, багатовимірного вимірювання (1D/2D/3D), підтримки багат шарових креслень і спільної роботи в хмарному середовищі. Проте, жоден з них не забезпечує повну автоматизацію, адже процес усе ще потребує експертного втручання для інтерпретації креслень і встановлення відповідностей між знайденими об'єктами та кошторисними позиціями [5; 9]. Автоматизація кількісного розрахунку ґрунтується на застосуванні алгоритмів ШІ, які виконують завдання сегментації зображень, розпізнавання об'єктів та їх класифікації. Моделі ШІ створюються на основі спеціалізованих анотованих наборів даних, що дозволяють ідентифікувати ключові елементи, такі як стіни, їх типи, кімнати та об'єкти на кресленнях. Після навчання ці моделі розгортаються у хмарних середовищах, що забезпечує масштабовану та ефективну обробку креслень. Крім того, текстова інформація, отримана з креслень, аналізується за допомогою мовних моделей, які дозволяють витягувати й структурувати важливі дані для подальшого використання. Програмне забезпечення, яке використовує ШІ, не лише автоматизує процес, але й значно оптимізує робочий процес у цілому. Завдяки хмарній архітектурі такі рішення не потребують встановлення на локальні пристрої, що зменшує технічні витрати та спрощує доступ до системи. Крім цього, автоматизація таких завдань, як сортування та маркування проектної документації, дозволяє значно скоротити час і ресурси, які раніше витрачалися на ручну працю. Кінцеві результати представлені у вигляді інтерактивних таблиць, які легко експортувати або інтегрувати у шаблони клієнтів. Додатково реалізовано функції для спільної роботи, що усуває необхідність пересилання великих файлів електронною поштою, дозволяючи використовувати безпечні посилання для доступу. Система також надає адміністраторам можливість управляти правами доступу, забезпечуючи високий рівень гнучкості, безпеки та контролю. У результаті такі інструменти суттєво підвищують продуктивність кошторесу, водночас зменшуючи кількість помилок і навантаження на виконавців [1].

Таблиця 1 – Порівняння можливостей основних застосунків

Критерій	Togal.AI	Bluebeam	PlanSwift	OnScreen
Підтримка AI-розпізнавання	так	ні	ні	ні
Робота з PDF-кресленнями	так	так	так	так
Хмарна архітектура	так	ні	так	ні
Спільна робота	так	ні	так	ні
Автоматичне виявлення символів	так	Обмежено	ні	ні
Підтримка масштабування	так	так	так	ні

Для систематизації знань і порівняння функціональних можливостей інструментів було визначено низку ключових критеріїв, серед яких — підтримка алгоритмів ШІ, можливість роботи з PDF-документацією, наявність хмарної архітектури, функціонал спільної роботи, автоматичне виявлення символів і масштабованість. За результатами аналізу найбільш повноцінне рішення – Togal.AI, тоді як інші продукти демонструють обмежену або часткову автоматизацію ключових процесів.

TakeOff. Основний функціонал застосунків використовує моделі сегментації для виділення стін, дверей, застосовується для розрахунку чистої площі й загальної площі. Знаходження об'єктів, таких як раковини, туалети, одинарні поворотні двері, подвійні поворотні двері, місця для паркування тощо, є важливою складовою процесу автоматизованого аналізу планів. Виявлення сходів є окремим завданням, яке також виконується системами штучного інтелекту під час аналізу креслень або зображень будівель. Класифікація знайдених об'єктів за областями або їх розподіл по стінах допомагає створити детальну карту приміщення для подальшого використання в проєктуванні або оцінці будівельних робіт. Аналогічно, у дослідженні [5] для оцінки площ стін використовувалася комбінація NLP та алгоритмів машинного навчання. Модель виділяла в кресленнях ключові слова (наприклад, «стіна»), а потім здійснювала вимірювання довжин і площ за допомогою image processing. Визначення масштабу креслення забезпечувало перехід від піксельних величин до метричних одиниць, що підвищувало точність автоматизованих розрахунків.

Важливим етапом підготовки даних для моделей є розмітка. Зазвичай для якісних даних використовується ручний формат, проте багато сучасних сервісів надають подібні можливості для винаймання контракторів (AWS SageMaker). Зберігаються дані безпосередньо у хмарному середовищі (S3). Важливо зазначити, що вони повинні бути нормалізовані, мати відомим безпосередній масштаб. Використовується безліч наявного функціоналу для конвертації різних форматів креслень PNV у PDF формат.

Функція сегментації стін знаходить і позначає стіни в архітектурних планах поверхів. Виявлення дверей здійснюється з метою отримання точного визначення їхнього розташування, що є складним завданням через часте повторення і однотипність елементів дверей. Нижче наведено приклади оригінального зображення (ліворуч), прогнозу моделі (посередині) та еталонного зображення, розміченого вручну (праворуч) (рис. 1).

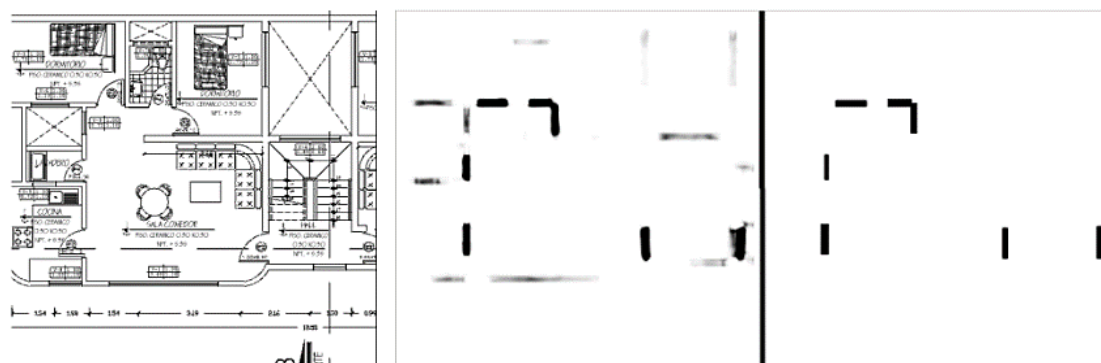


Рис. 1. Приклад послідовної обробки PDF файлу моделлю

Джерело: розроблено авторами.

Як видно із результатів обробки, модель потребує додаткового доопрацювання для покращення точності.

Метою сегментації дверей є отримання дуже точного виявлення та локалізації пікселів, що належать до дверей, як показано на зображенні нижче (рис. 2). Тут цікавий лише власне поріг дверей, а виявлення об'єктів ускладнено, оскільки двері досить часто повертаються. Сучасні дослідження демонструють, що використання глибоких моделей у поєднанні з попередньою анотацією креслень дозволяє досягти високої точності навіть у випадку обмеженого набору класів [10].

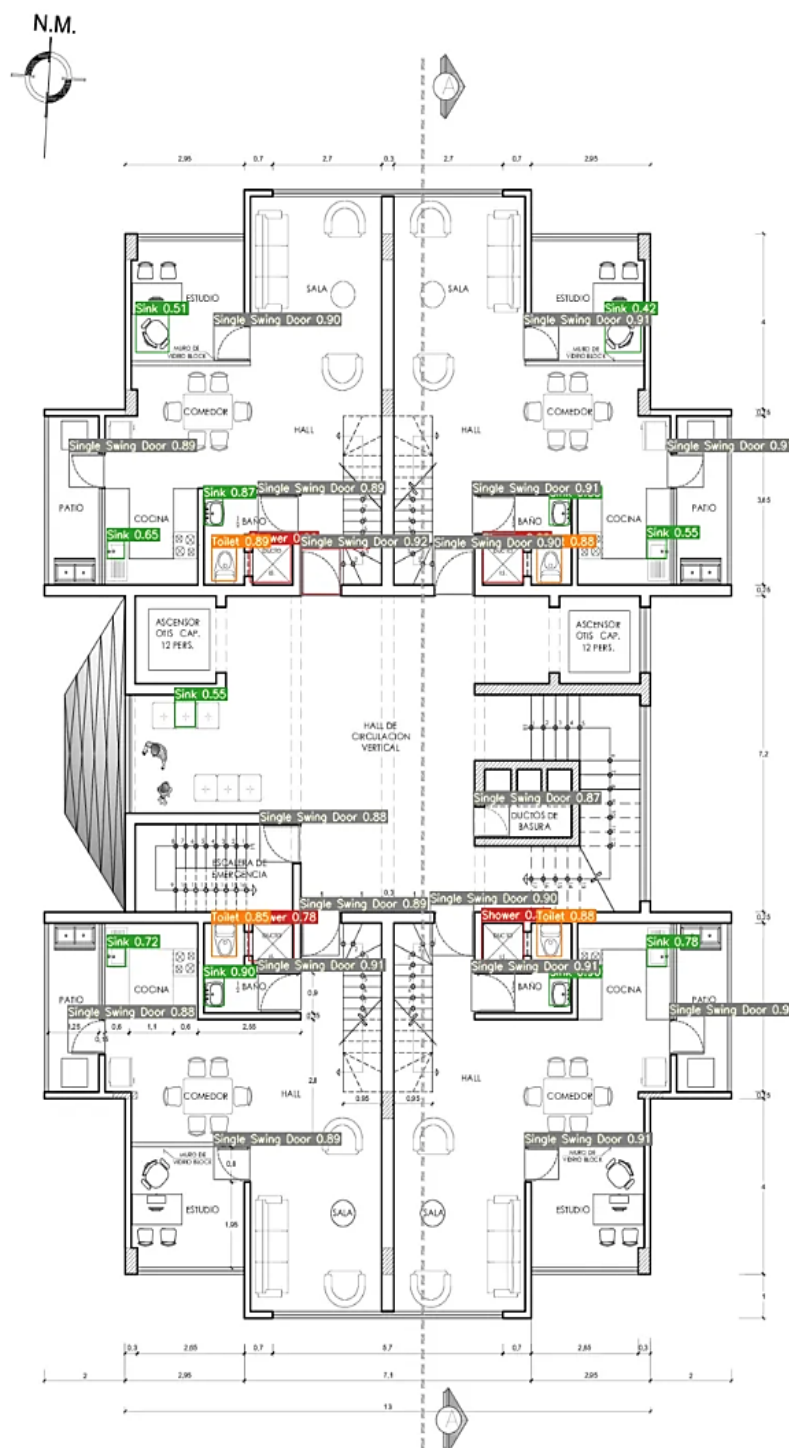


Рис. 2. Приклад знаходження дверей моделлю
Джерело: розроблено авторами.

Використана архітектура є відносно стандартною каскадною архітектурою кодера-декодера з магістраллю ResNet-50 і головою PointRend. Модель визначається разом із гіперпараметризацією навчання та висновку. Для розгортання можуть бути використані сервіси, наприклад, AWS SageMaker з використанням ECS і TorchServe для оркестрування системи із моделями. Після виявлення й опису складнощів із сегментацією дверей та стін, у процесі обробки будівельних креслень пропонується комплексний підхід автоматизованого аналізу креслення (takeoff), що представлений у вигляді flowchart-діаграми (рис. 3).

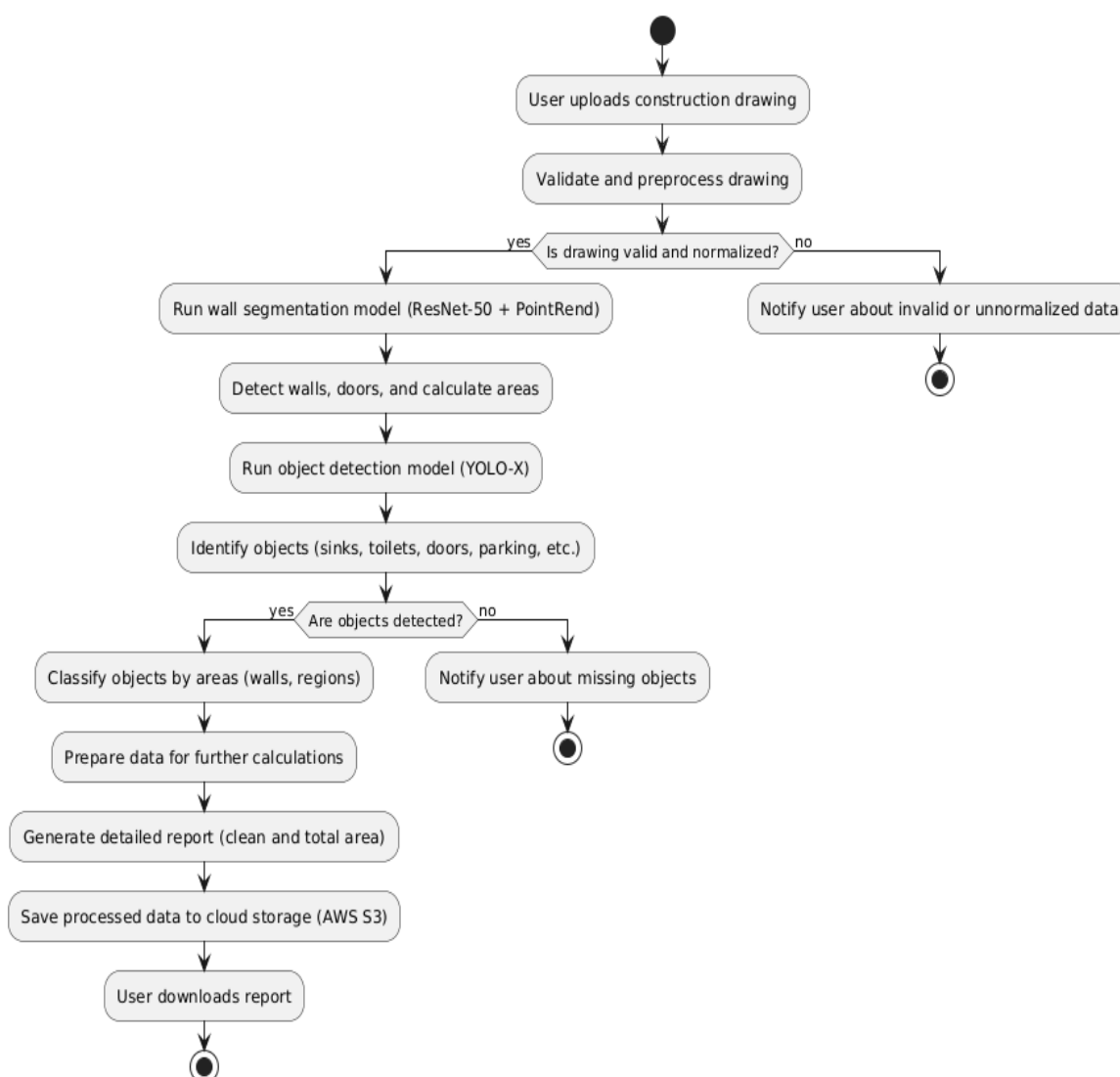


Рис. 3. Flowchart діаграма процесу takeoff

Джерело: розроблено авторами.

Процес починається із завантаження користувачем креслення, його валідації та попередньої обробки. У разі відповідності креслення стандартам і нормалізації запускається модель сегментації стін (на основі ResNet-50 та PointRend) для точного визначення стін, дверей та розрахунку площ. Для додаткової точності локалізації об'єктів застосовується модель виявлення об'єктів YOLO-X, що дозволяє ідентифікувати додаткові елементи, такі як сантехніка, двері, паркувальні місця тощо. Виявлені об'єкти класифікуються за окремими зонами (стіни, регіони, двері тощо), після чого дані готуються до подальших розрахунків. На завершальному етапі процесу відбувається генерація детального звіту із зазначенням

чистої та загальної площі приміщень. Оброблені дані зберігаються у хмарному сховищі AWS S3, і користувач має змогу завантажити готовий звіт. У разі неможливості ідентифікації об'єктів або інших невідповідностей система інформує користувача про відповідні помилки чи пропущені елементи. Таким чином, запропонована архітектура та логіка роботи системи забезпечують автоматизацію аналізу будівельних креслень, дозволяючи значно підвищити ефективність і точність виконання кількісних розрахунків у порівнянні з ручною обробкою. Наступним кроком є детальний аналіз отриманих результатів та їх обговорення.

У межах тестування реалізованої архітектури, що включає сегментаційну модель на основі ResNet-50 з PointRend, точність (IoU) сегментації стін на валідаційній вибірці становила близько 87 %. Для виявлення дверей за допомогою YOLO-X було досягнуто точності на рівні 91 % (mean average precision, mAP). Ці результати підтверджують переваги поєднання каскадної сегментації та об'єктного детектора нового покоління для задач попередньої обробки креслень. Для порівняння, базові архітектури на кшталт U-Net демонструють IoU на рівні 75–80 % у подібних задачах.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика точності моделей сегментації та виявлення об'єктів для аналізу креслень

Модель / Підхід	Тип задачі	IoU / Точність	Примітки
ResNet-50 + PointRend	Сегментація стін	~87% (IoU)	На власній валідації
YOLO-X	Виявлення дверей	~91% (mAP)	Для об'єктів з ротацією
U-Net (базова)	Сегментація	~78% (IoU)	Для бінарного поділу на стіни/фон
Faster R-CNN	Об'єктне виявлення	~86% (mAP)	Для статичних символів

Джерело: сформовано авторами.

Наведені показники засновані на внутрішньому експериментальному середовищі, на основі більш ніж 17 000 креслень у форматі PDF, конвертованих до PNG зі збереженням масштабу (1 px $\approx$ 1').

Висновки. Автоматизація процесу кількісного розрахунку (QTO) у будівельній галузі є важливим кроком на шляху до підвищення ефективності, точності та зменшення витрат. Використання штучного інтелекту (ШІ) та комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати трудомісткі завдання, такі як розпізнавання тексту, символів і патернів на кресленнях. Це забезпечує значну економію часу, мінімізує ризики людських помилок і підвищує якість проєктної документації. Дослідження показали, що сучасні інструменти, такі як TotalAI, здатні досягати високої точності (понад 98 %) при аналізі креслень і кількісному розрахунку, інтегруючи алгоритми машинного навчання та інноваційні методи обробки тексту. Водночас такі технології, як обробка природної мови (NLP), активне навчання та сегментаційні моделі (наприклад, Segment Anything Model), значно розширюють можливості аналізу й обробки даних, забезпечуючи високий рівень автоматизації. Незважаючи на це, залишається низка викликів, таких як інтеграція різних програмних рішень, високі обчислювальні вимоги та потреба в адаптації алгоритмів до специфічних умов будівництва. Також важливою проблемою є опір галузі впровадженню новітніх технологій через високу вартість та необхідність перекваліфікації персоналу. Таким чином, впровадження автоматизованих підходів на основі ШІ та комп'ютерного зору для QTO відкриває нові можливості для оптимізації процесів у будівництві, але потребує подальших досліджень та вдосконалення. Майбутні роботи можуть бути зосереджені на розробці більш доступних рішень, інтеграції з існуючими платформами управління проєктами та аналізі соціальних і економічних аспектів впровадження таких технологій.

Список використаних джерел

1. National Academy of Construction. (2024). *Adoption of artificial intelligence in quantity takeoffs in engineering and construction projects*. National Academy of Construction.

2. Chen, X., Chang-Richards, A. Y., Pelosi, A., Jia, Y., Shen, X., Siddiqui, M. K., & Yang, N. (2021). Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2021-0172>.
3. Tang, S., Liu, H., Almatared, M., Abudayyeh, O., Lei, Z., & Fong, A. (2022). Towards automated construction quantity take-off: An integrated approach to information extraction from work descriptions. *Buildings*, 12(3), 354. <https://doi.org/10.3390/buildings12030354>.
4. Karan, E., Irizarry, J., Haymaker, J., & Al-Hussein, M. (2021). Using artificial intelligence to automate the quantity takeoff process. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(6), 04021050.
5. Tegal.AI. (2024). *Tegal.AI knowledge base*. <https://help.tegal.ai>.
6. Bluebeam. (2020). *Bluebeam Revu 20 help guide*. <https://support.bluebeam.com/online-help/revu20/Content/RevuHelp/Dashboard.htm>.
7. Chen, X., Chang-Richards, A. Y., Pelosi, A., Jia, Y., Shen, X., Siddiqui, M. K., & Yang, N. (2021). Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2021-0172>.
8. Rane, N. (2023). Integrating building information modelling (BIM) and artificial intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: Challenges and opportunities. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4616055>.
9. PlanSwift. (2018). *PlanSwift user guide version 10.1.1 (30-11-2018)*. <https://planswiftuk.co.uk/wp-content/uploads/2019/06/PlanSwiftUserGuideVersion1011-30-18.pdf>.
10. Jamieson, L., Moreno-Garcia, C. F., & Elyan, E. (2024). Towards fully automated processing and analysis of construction diagrams: AI-powered symbol detection. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*. <https://doi.org/10.1007/s10032-024-00492-9>.

References

1. National Academy of Construction. (2024). *Adoption of artificial intelligence in quantity takeoffs in engineering and construction projects*. National Academy of Construction.
2. Chen, X., Chang-Richards, A. Y., Pelosi, A., Jia, Y., Shen, X., Siddiqui, M. K., & Yang, N. (2021). Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2021-0172>.
3. Tang, S., Liu, H., Almatared, M., Abudayyeh, O., Lei, Z., & Fong, A. (2022). Towards automated construction quantity take-off: An integrated approach to information extraction from work descriptions. *Buildings*, 12(3), 354. <https://doi.org/10.3390/buildings12030354>.
4. Karan, E., Irizarry, J., Haymaker, J., & Al-Hussein, M. (2021). Using artificial intelligence to automate the quantity takeoff process. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(6), 04021050.
5. Tegal.AI. (2024). *Tegal.AI knowledge base*. <https://help.tegal.ai>.
6. Bluebeam. (2020). *Bluebeam Revu 20 help guide*. <https://support.bluebeam.com/online-help/revu20/Content/RevuHelp/Dashboard.htm>.
7. Chen, X., Chang-Richards, A. Y., Pelosi, A., Jia, Y., Shen, X., Siddiqui, M. K., & Yang, N. (2021). Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Engineering, Construction and Architectural Management, ahead-of-print*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/ecam-02-2021-0172>.
8. Rane, N. (2023). Integrating building information modelling (BIM) and artificial intelligence (AI) for smart construction schedule, cost, quality, and safety management: Challenges and opportunities. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4616055>.
9. PlanSwift. (2018). *PlanSwift user guide version 10.1.1 (30-11-2018)*. <https://planswiftuk.co.uk/wp-content/uploads/2019/06/PlanSwiftUserGuideVersion1011-30-18.pdf>.
10. Jamieson, L., Moreno-Garcia, C. F., & Elyan, E. (2024). Towards fully automated processing and analysis of construction diagrams: AI-powered symbol detection. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR)*. <https://doi.org/10.1007/s10032-024-00492-9>.

Отримано 19.06.2025

Mykyta Kovalenko¹, Mariia Voitsekhovska²¹Postgraduate student, PhD candidate in specialty 122

National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kovalenkomyk6@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-1223-9638>²PhD, Associate Professor at the Department of Information Technology and Software Engineering

National University "Chernihiv Polytechnic" (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: m.voitsekhovska@stu.cn.ua, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1711-101X>**AUTOMATION OF PRE-CONSTRUCTION: AN OVERVIEW OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS AND PRACTICAL APPLICATIONS IN THE INDUSTRY**

The construction industry, traditionally slow in adopting digital innovations, continues to face critical inefficiencies during the pre-construction phase—particularly in quantity takeoff (QTO), cost estimation, and architectural drawing analysis. This article explores the transformative potential of artificial intelligence (AI) and computer vision (CV) in automating these essential yet labor-intensive processes. The study reviews leading tools such as Tegal, BlueBeam, PlanSwift, and OnScreen, which leverage machine learning to recognize patterns, detect symbols, and extract structured data from PDF-based construction documents. These technologies enable the accurate identification of architectural components—including walls, doors, plumbing fixtures, and parking areas—with precision exceeding 98%, significantly reducing human labor and errors. Despite these advancements, the article outlines existing limitations such as the reliance on high-quality annotated datasets, occasional segmentation inaccuracies, and the challenge of integrating AI-driven systems with traditional project management environments. Manual review is still required to ensure final accuracy. To address these gaps, the authors propose a scalable, modular cloud-based architecture that employs ResNet-50 with PointRend for fine-grained wall and door segmentation, YOLO-X for object detection, and Natural Language Processing (NLP) for analyzing textual content. The entire workflow is visualized via a flowchart diagram that guides the user through validation, segmentation, classification, error handling, and final report generation. The findings demonstrate that AI-enhanced QTO systems significantly improve planning accuracy, reduce risks, and foster collaboration—while also highlighting the need for continued innovation and broader industry adoption to fully unlock digital transformation in construction.

Keywords: construction; automation; computer vision; pre-construction stage; takeoff; information retrieval.

Fig.: 3. Tables: 2. References: 10.

Сергій Васильович Коваленко¹, Олексій Васильович Красножон²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-23

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: kovalenkoptp10@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6993-010X>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

ResearcherID: [G-4623-2014](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X). Scopus Author ID: [57190377188](https://orcid.org/0000-0003-2500-254X)

МЕТОДИ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У СИСТЕМАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ КОРИСТУВАЧІВ НА ОСНОВІ КЛАВІАТУРНОГО ПОЧЕРКУ

Запропонована стаття є оглядовою, її присвячено дослідженню існуючих методів ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерку, зокрема таких, як методи динамічного аналізу тривалості натискання клавіш, статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту та нейромережові підходи до класифікації користувачів.

Методи динамічного аналізу тривалості натискання клавіш базуються на вимірюванні часових характеристик набору тексту, таких як середній інтервал між натисканнями та утриманням клавіш. Ці параметри є унікальними для кожного користувача та можуть використовуватися для автентифікації.

Статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту дозволяють аналізувати комбінації символів, які вводяться з певною швидкістю та послідовністю. Використання таких моделей дає змогу виявляти закономірності у введенні тексту, що допомагає у верифікації користувача.

Нейромережові підходи до класифікації користувачів використовують глибоке навчання для обробки великих обсягів даних про клавіатурний почерк. Ці методи дозволяють створювати складні багаторівневі моделі для аналізу поведінкових характеристик набору тексту, що підвищує точність ідентифікації.

Використання методів динамічного аналізу, статистичних моделей і нейромережових алгоритмів може значно підвищити рівень безпеки користувачів, знизити ризики несанкціонованого доступу та забезпечити надійну ідентифікацію в інформаційних системах.

Ключові слова: клавіатурний почерк; біометрична автентифікація; ідентифікація користувачів; динамічний аналіз затримок; статистичні моделі розпізнавання; нейромережові алгоритми; поведінкова автентифікація; машинне навчання; інформаційна безпека; первинна обробка даних.

Рис.: 1. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Сучасні інформаційні технології постійно вдосконалюють методи ідентифікації користувачів, оскільки традиційні паролі та інші статичні методи автентифікації не завжди забезпечують належний рівень безпеки. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є використання клавіатурного почерку, який дозволяє аналізувати індивідуальні особливості набору тексту для підтвердження особи користувача.

Зростання інтересу до цієї технології зумовлено низкою факторів, зокрема:

- паролі часто піддаються атакам, забуваються або передаються третім особам, що створює ризик несанкціонованого доступу;

- на відміну від разової перевірки пароля при вході, аналіз клавіатурного почерку дозволяє здійснювати контроль користувача протягом усього сеансу роботи із системою;

- методи ідентифікації за клавіатурним почерком можуть бути інтегровані в банківські системи, корпоративні мережі, освітні платформи тощо для підвищення безпеки.

Згідно з дослідженнями в галузі біометричної автентифікації, методи аналізу клавіатурного почерку дозволяють досягти високого рівня точності при мінімальних витратах на впровадження, оскільки не потребують додаткового обладнання. Водночас проблема первинної обробки даних у таких системах залишається актуальною через необхідність ефективної фільтрації, нормалізації та аналізу великої кількості параметрів.

Таким чином, розвиток інформаційних систем первинної обробки даних у системах ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерку є важливою науковою та практичною задачею, вирішення якої сприятиме підвищенню рівня безпеки та зниженню ризиків несанкціонованого доступу до інформаційних ресурсів.

Постановка проблеми. Основними проблемами, які виникають при розробці та впровадженні систем автентифікації на основі клавіатурного почерку, є:

1. Низька точність у порівнянні з іншими біометричними методами: клавіатурна біометрія поступається технологіям розпізнавання обличчя, відбитків пальців або райдужної оболонки ока за рівнем ідентифікації користувача.

2. Вплив зовнішніх факторів: фізичний стан користувача (втома, емоційний стан) або зміна пристрою введення можуть суттєво впливати на характеристики набору тексту, що ускладнює коректну автентифікацію.

3. Необхідність адаптації до змін у поведінці користувача: шаблони клавіатурного почерку можуть змінюватися з часом, тому система повинна забезпечувати механізми оновлення еталонних даних для мінімізації відхилення легітимних користувачів.

4. Обмеженість стандартних наборів даних: у порівнянні з іншими біометричними методами, є небагато відкритих наборів даних для навчання моделей, що ускладнює розробку ефективних алгоритмів машинного навчання.

5. Ризики атак та шахрайств: хоча клавіатурна біометрія є складнішою для підробки, існують методи імітації почерку, які можуть бути використані зловмисниками для обходу систем безпеки [1].

На рис. 1 представлено класифікацію існуючих методів автентифікації, включаючи біометричні технології, серед яких клавіатурна біометрія посідає окреме місце в поведінковій автентифікації [1].

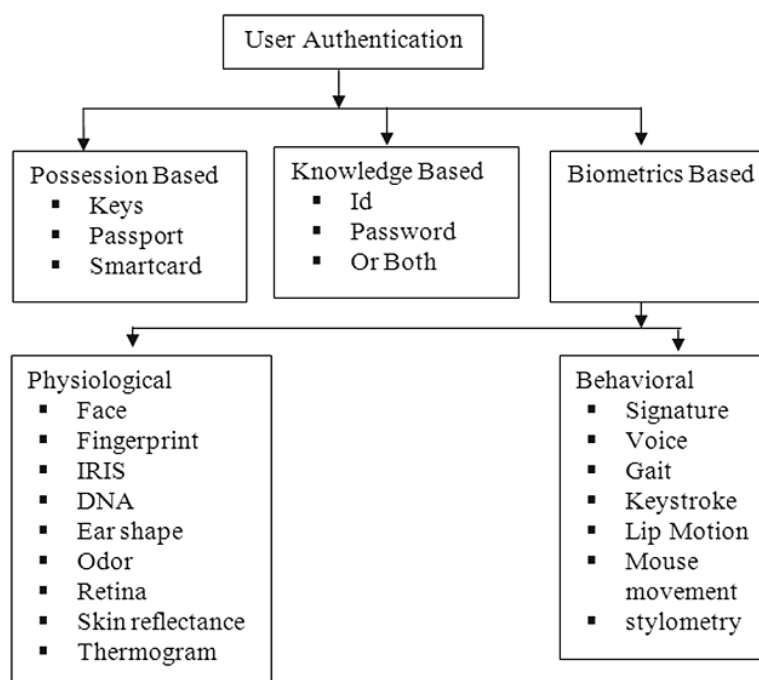


Рис. 1. Онтологія різних методів автентифікації

Джерело: [1].

Центральною проблемою, що розглядається в цьому дослідженні, є забезпечення надійної первинної обробки даних клавіатурного почерку, яка дозволяє зменшити вплив зовнішніх факторів, підвищити точність автентифікації та забезпечити стабільність характеристик у динаміці поведінки користувача. Саме від якості попередньої обробки даних залежить ефективність подальшого застосування алгоритмів розпізнавання та ідентифікації в реальних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що методи ідентифікації користувачів за клавіатурним почерком, зокрема методи динамічного аналізу затримок натискання клавіш, статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту та нейромережіві підходи до класифікації користувачів, демонструють значний прогрес у забезпеченні високої точності автентифікації. Ці методи мають велику перспективу для покращення безпеки в інформаційних системах і можуть значно знизити ризики несанкціонованого доступу [2].

Методи динамічного аналізу затримок натискання клавіш орієнтуються на вимірювання часового інтервалу між натисканнями клавіш, а також на аналіз середнього часу натискання клавіш і періодів між натисканнями та утриманням клавіші. Оскільки ці параметри є індивідуальними для кожного користувача, вони можуть бути використані для автентифікації. Зокрема, час між натисканнями клавіш дозволяє визначити стиль набору тексту конкретного користувача, що є унікальним для кожної особи та допомагає ідентифікувати користувача серед інших. Ці методи забезпечують високу чутливість та специфічність для розпізнавання користувачів [3].

Статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту зосереджуються на виявленні регулярних залежностей у введенні тексту, таких як швидкість набору, послідовність натискання клавіш та комбінації символів. Статистичні методи аналізують середні значення та стандартні відхилення часів між натисканнями для побудови профілю користувача. Це дозволяє виявляти приховані закономірності в поведінці набору тексту, що покращує точність автентифікації. Останні дослідження показують, що ці методи продовжують використовуватись у багатьох системах, але вони поступаються більш сучасним методам, таким як нейронні мережі, за точністю та гнучкістю [3].

Нейромережеві методи, зокрема методи глибокого навчання, здатні обробляти великі обсяги даних про клавіатурний почерк, створюючи складні моделі для класифікації користувачів. Вони забезпечують високу точність, оскільки враховують різноманітні фактори, такі як тиск на клавіші, тривалість натискання та інші варіації в поведінці користувача. Ці підходи також можуть адаптуватися до змін у стилі набору тексту, що дає можливість здійснювати точну автентифікацію навіть при змінах у поведінці користувача з часом. Вони є одними з найбільш точних підходів для ідентифікації користувачів у системах безпеки [3].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на значний прогрес у розвитку систем автентифікації на основі клавіатурного почерку, існує низка невирішених питань, які потребують додаткового дослідження. Однією з основних проблем є недостатня точність ідентифікації в порівнянні з іншими біометричними методами, такими як відбитки пальців або розпізнавання обличчя.

Ще одним важливим аспектом є адаптація алгоритмів до змін у поведінці користувача. Наразі більшість систем використовує статичні моделі, які не враховують природні зміни в ритмі друку, спричинені втому, стресом або використанням різних пристроїв введення. Це може призводити до збільшення рівня помилкових відмов легітимним користувачам.

Мета статті. Метою цієї статті є дослідження існуючих методів ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерку, аналіз їх ефективності та визначення напрямів розвитку інформаційних систем первинної обробки даних. Дослідження охоплює основні алгоритми, що використовуються для аналізу динамічних характеристик набору тексту, а також перспективи застосування машинного навчання та адаптивних моделей у цій сфері. Особлива увага приділяється проблемам забезпечення високої точності, адаптації до змін у поведінці користувачів та можливим загрозам безпеки, пов'язаним із підлогою клавіатурного почерку.

Виклад основного матеріалу. Методи динамічного аналізу затримок натискання клавіш є одним з основних підходів для автентифікації користувачів за допомогою клавіатурного почерку. Вони базуються на вимірюванні різних часових характеристик під час набору тексту, зокрема середнього часу натискання клавіші, інтервалів між натисканнями, а також тривалості утримання клавіші. Це дозволяє створити унікальний профіль поведінки кожного користувача, що є основою для подальшої автентифікації [4].

Один з основних аспектів динамічного аналізу полягає в вимірюванні часу між натисканнями клавіш, який має тенденцію варіюватися від користувача до користувача. Динамічний аналіз включає не тільки безпосередній час натискання, але й час, що проходить між натисканнями сусідніх клавіш, а також час між натисканням і відпусканням клавіші [5]. Такі параметри є індивідуальними для кожного користувача і створюють унікальний «візерунок» або шаблон, який можна використовувати для ідентифікації. Наприклад, швидкий або повільний набір тексту, часті помилки чи корекції під час набору можуть бути відображені в часових інтервалах між натисканнями клавіш. Таким чином, навіть якщо користувач змінює інтерфейс або пристрій введення, його стиль набору тексту може залишатися достатньо стабільним для ідентифікації [6].

Крім того, важливе значення мають такі характеристики, як час утримання клавіші. Цей параметр є індикатором того, наскільки довго користувач утримує певну клавішу, що також може варіюватися між людьми залежно від їхнього стилю набору тексту. Наприклад, людина, яка швидко набирає текст, може утримувати клавіші на короткий період, тоді як користувач, що набирає текст повільніше, може утримувати клавіші довше. Це робить методи динамічного аналізу дуже корисними для автентифікації в реальному часі, оскільки вони дозволяють відстежувати навіть мінімальні зміни в поведінці користувача.

Методи динамічного аналізу також можуть бути використані для виявлення аномалій у поведінці користувачів. Наприклад, якщо певний користувач раптово змінює стиль набору тексту (наприклад, його інтервали між натисканнями клавіш різко змінюються або він починає набирати текст набагато повільніше), це може свідчити про спробу несанкціонованого доступу або атаки, що змушує систему активувати додаткові заходи безпеки. Застосування алгоритмів машинного навчання та статистичних моделей для аналізу цих змін дозволяє підвищити точність системи автентифікації та знизити рівень помилкових відмов [6].

Однією з переваг методів динамічного аналізу є їхня здатність адаптуватися до змін у поведінці користувачів з часом. Наприклад, користувач може змінювати свою швидкість набору тексту через фізичні або психологічні зміни, такі як втома, стрес або зміна робочого середовища. Динамічні методи можуть бути налаштовані таким чином, щоб враховувати ці зміни, а отже, зберігати точність автентифікації навіть в умовах змін у поведінці користувача.

Однак, попри свою високу ефективність, методи динамічного аналізу мають і певні недоліки. Один із них – це вплив різноманітних факторів, таких як використання різних пристроїв (наприклад, клавіатур на різних типах пристроїв), що можуть змінювати інтервали натискання клавіш та тривалість утримання. Іншим обмеженням є потенційна зміна поведінки користувачів через фізичні фактори (наприклад, травми пальців або зміни в фізичному стані), що може призвести до невірної ідентифікації [6].

Статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту є інструментом для ідентифікації та автентифікації користувачів на основі їх індивідуального стилю введення. Ці моделі ґрунтуються на математичних та статистичних методах для виявлення регулярних залежностей у поведінці користувача під час набору тексту, що дозволяє створювати унікальні профілі для кожної особи. Вони можуть бути використані для автентифікації користувачів, запобігання шахрайству, а також для забезпечення безпеки в онлайн-системах.

Статистичні моделі для розпізнавання шаблонів набору тексту зазвичай включають такі компоненти, як тривалість натискання клавіші, інтервали між натисканнями клавіш, а також стиль набору тексту в цілому. Основний принцип цих моделей полягає в тому, щоб за допомогою різних алгоритмів і статистичних методів аналізувати та класифікувати ці шаблони. Однією з найбільш поширених методик є використання статистичних класифікаторів, таких як методи на основі ймовірнісних моделей (Naive Bayes), лінійні або нелінійні класифікатори, а також нейронні мережі [7].

Одним із ключових аспектів статистичних моделей є аналіз ймовірностей певних подій, наприклад, ймовірність натискання певної клавіші в конкретний момент часу або ймовірність появи певного інтервалу між натисканнями клавіш. Ці ймовірності потім використовуються для побудови профілю користувача, що дозволяє ідентифікувати його на основі шаблонів набору тексту, які він генерує. Застосування ймовірнісних моделей дає змогу системам автентифікації враховувати статистичні коливання в поведінці користувачів, наприклад, через фізіологічні або психологічні зміни, які можуть вплинути на стиль набору тексту.

Важливим етапом у розпізнаванні шаблонів набору тексту є попередня обробка даних. Це включає фільтрацію шуму, усунення аномальних даних та нормалізацію інтервалів часу між натисканнями клавіш. Завдяки цьому можна отримати більш точні й стабільні характеристики для кожного користувача, що полегшує подальшу класифікацію та зменшує ймовірність помилкових спрацювань системи автентифікації [7]. Крім того, перед обробкою даних важливо розуміти, як різні фактори, такі як стрес, втома або використання різних пристроїв введення, можуть вплинути на стиль набору тексту, що може змінити статистичні характеристики шаблонів.

Одним із підходів до побудови статистичних моделей є використання марковських моделей для моделювання послідовностей натискань клавіш. Марковські моделі можуть бути використані для моделювання ймовірностей переходу від одного натискання клавіші до іншого, що дозволяє аналізувати ідентифікаційні шаблони набору тексту на основі послідовностей подій. Вони можуть враховувати як поточний стан, так і історичні дані, що дозволяє моделі адаптуватися до змін у поведінці користувачів із часом [8].

З іншого боку, статистичні моделі можуть стикатися із проблемами, пов'язаними з адаптацією до змін у поведінці користувачів. Наприклад, зміна пристрою введення (перехід із ноутбука на смартфон) може значно змінити шаблони набору тексту. Для вирішення цих проблем необхідно використовувати гібридні моделі, що комбінують статистичні методи з іншими технологіями, такими як аналіз контексту чи поведінкові аналізи, що дозволяє зменшити вплив таких змін на точність системи [8].

Крім того, важливим аспектом є ймовірність появи помилкових спрацювань або високої чутливості до змін у поведінці користувача. Тому багато сучасних систем використовують багаторівневі методи автентифікації, що поєднують статистичні моделі з іншими біометричними характеристиками, такими як розпізнавання обличчя або відбитків пальців. Це дозволяє досягти вищої точності при збереженні надійності та стійкості до атак [8].

Для підвищення точності розпізнавання шаблонів набору тексту використовуються методи машинного навчання, зокрема глибокі нейронні мережі (Deep Neural Networks, DNNs), вони дозволяють будувати складні багаторівневі представлення даних, що дає змогу ефективно класифікувати користувачів на основі їхніх унікальних характеристик. Нейронні мережі здатні автоматично виділяти важливі риси з великих наборів даних і пристосовуватися до нових шаблонів поведінки користувачів. Це дозволяє знижувати ймовірність помилкових відмов та підвищувати точність системи навіть за умов великих змін у стилі набору тексту користувачем [9].

Нейромережеві підходи до класифікації користувачів є одними з найсучасніших та ефективних методів у сфері біометричної автентифікації, зокрема для класифікації користувачів на основі їхнього стилю набору тексту. Нейронні мережі, завдяки своїй здатності навчатися з великих обсягів даних і виявляти складні, нелінійні зв'язки, використовуються для побудови моделей, які можуть автоматично класифікувати користувачів на основі їхніх індивідуальних шаблонів введення. Застосування нейромереж дозволяє значно підвищити точність і стійкість системи, зменшуючи ймовірність помилкових відмов і помилкових спрацьовувань при автентифікації користувачів [9].

Основні переваги нейронних мереж у класифікації користувачів полягають у їхній здатності працювати з великими обсягами даних, їх адаптивності до змін у поведінці користувачів та здатності виділяти значущі риси навіть із неструктурованих даних, таких як інтервали між натисканнями клавіш або тривалість натискання. Крім того, нейромережі можуть обробляти складні залежності між характеристиками, що дозволяє враховувати всі можливі аспекти поведінки користувача, які можуть варіюватися від фізіологічних змін до впливу стресових ситуацій або зміни пристроїв введення [9].

Для класифікації користувачів на основі стилю набору тексту використовуються різні архітектури нейронних мереж, серед яких найбільш популярними є багатошарові перцептрони (Multi-Layer Perceptron або MLP), згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Network або CNN) і рекурентні нейронні мережі (Recurrent neural Network або RNN). Кожен із цих підходів має свої особливості і переваги залежно від типу даних і поставленої задачі [10].

Рекурентні нейронні мережі використовуються для роботи із послідовностями даних, де важливий контекст та порядок подій. Оскільки набір тексту є послідовним процесом, де кожне натискання клавіші може залежати від попередніх, RNN є дуже підходящим для задач класифікації користувачів за допомогою їхнього стилю набору тексту. Використовуючи внутрішні стани для збереження контексту, ці мережі можуть ефективно обробляти послідовності натискання клавіш і створювати точні профілі користувачів [10].

Згорткові нейронні мережі часто використовуються для роботи із зображеннями, але вони також можуть бути ефективно застосовані для аналізу послідовностей даних, таких як шаблони набору тексту. Використовуючи операції згортки, CNN можуть автоматично виявляти важливі особливості в послідовностях натискання клавіш, що дозволяє підвищити точність класифікації. У контексті класифікації користувачів це означає, що мережа може ефективно розпізнавати шаблони введення, які є характерними для конкретного користувача, навіть при варіаціях його поведінки [11].

Багатошарові перцептрони є одними з найпростіших видів нейронних мереж, але вони можуть бути дуже ефективними при класифікації користувачів за допомогою шаблонів набору тексту. Вони складаються із вхідного, одного або декількох прихованих і вихідного шарів, що дозволяє моделі навчатися від простих до більш складних ознак. Для задачі класифікації користувачів такий тип мережі може використовувати характеристики натискання клавіші, такі як інтервал між натисканнями, тривалість натискання та інші параметри, що допомагає створити унікальні профілі користувачів [12].

Процес навчання нейронних мереж для класифікації користувачів передбачає використання великих наборів даних, що містять інформацію про шаблони набору тексту різних користувачів. Дані, зібрані під час введення тексту, зазвичай включають інформацію про інтервали між натисканнями клавіш, тривалість натискання, швидкість введення та інші характеристик. Під час навчання нейронна мережа вивчає ці дані та створює модель, яка може класифікувати нові дані, отримуючи точніші результати щодо того, до якого користувача належить той чи інший набір шаблонів [12].

Нейронні мережі, на відміну від традиційних статистичних методів, здатні працювати із неструктурованими даними й автоматично визначати важливі характеристики без потреби в ручному відборі ознак. Це дозволяє зменшити людський фактор і підвищити точність класифікації, навіть коли користувач змінює свій стиль набору тексту або використовує різні пристрої введення [13].

Незважаючи на високий потенціал штучних нейронних мереж для класифікації користувачів, існують деякі виклики, пов'язані з їх застосуванням у реальних умовах. Одним із головних викликів є проблема адаптації до змін у поведінці користувача. Зміни у пристроях введення, психологічному стані користувача або навіть зміна середовища можуть значно вплинути на шаблони набору тексту. Для вирішення цієї проблеми часто використовуються методи перенавчання або комбінування різних типів мереж, що дозволяє адаптувати модель до нових умов.

Іншим важливим аспектом є проблема загальної варіативності серед користувачів. Не всі користувачі мають однаковий стиль набору тексту, і нейронні мережі повинні бути здатні враховувати цю різноманітність для досягнення високої точності класифікації. Це може вимагати додаткових налаштувань і параметризації моделей для забезпечення більшої гнучкості при обробці даних [13].

Висновки. У статті було розглянуто основні методи ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерку, зокрема динамічний аналіз затримок натискання клавіш, статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту та нейромережеві підходи до класифікації користувачів. Проведений аналіз дозволяє визначити переваги та обмеження кожного з методів, а саме:

- методи динамічного аналізу затримок натискання клавіш забезпечують простоту впровадження та не потребують додаткового обладнання, проте їхня точність може знижуватися під впливом зовнішніх факторів, таких як зміна пристрою введення чи фізичний стан користувача;

- статистичні моделі розпізнавання шаблонів набору тексту дозволяють аналізувати послідовності символів та їх характеристики, що підвищує стійкість до випадкових змін у почерку, але вимагає збору значного обсягу даних для коректного навчання;

- нейромережеві підходи демонструють високу точність розпізнавання користувачів завдяки здатності враховувати нелінійні залежності у даних, проте їх реалізація потребує значних обчислювальних ресурсів та якісних наборів даних для навчання.

Зважаючи на все зазначене вище, використання комбінованих методів, що поєднують динамічний аналіз затримок із машинним навчанням, є найбільш перспективним напрямком розвитку систем ідентифікації користувачів на основі клавіатурного почерку. Це дозволить підвищити рівень безпеки інформаційних систем та мінімізувати ризик від несанкціонованого доступу.

Список використаних джерел

1. Shadman, R., Wahab, A. A., Manno, M., Lukaszewski, M., Hou, D., & Hussain, F. (2025). Keystroke dynamics: Concepts, techniques, and applications. *ACM Computing Surveys*. <https://www.semanticscholar.org/reader/826113b73fa96eb1d6be90e66ae688c06d086109>.
2. Shanmugapriya, D., & Padmavathi, G. (2010). A Survey of Biometric Keystroke Dynamics: Approaches, *International Journal of Computer Science and Information Security*, 5(1) https://www.researchgate.net/publication/41171720_A_Survey_of_Biometric_keystroke_Dynamics_Approaches_Security_and_Challenges.
3. Rashik Shadman Ahmed Anu Wahab Michael Manno Matthew Lukaszewski Daqing Hou Faraz Hussain (2024). *Keystroke Dynamics: Concepts, Techniques, and Applications* <https://arxiv.org/pdf/2303.04605>.
4. Teh, P. S., Teoh, A. B. J., & Yue, S. (2013). A survey of keystroke dynamics biometrics. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2013/408280>.

5. Puvirajasingam, K., & Sangeetha, D. (2013). Biometric Authentication using Keystroke Dynamics: A Survey. *IJREAT International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 1(5). <http://ijreat.org/Papers%202013/Issue5/IJREATV115079.pdf>.
6. Gaines, R. & Lisowski, William & Press, S. & Shapiro, Norman. (1980). Authentication by Keystroke Timing: Some Preliminary Results. 52.
7. Migdal, D., & Rosenberger, C. (2019). Statistical modeling of keystroke dynamics samples for the generation of synthetic datasets. *Future Generation Computer Systems*, 100, 907–920. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.03.056>.
8. Revett, K., Gorunescu, F., Gorunescu, M., Ene, M., Tenreiro de Magalhães, S., & Santos, H. (2007). A machine learning approach to keystroke dynamics based user authentication. *International Journal of Electronic Security and Digital Forensics*, 1(1), 55–70. https://www.researchgate.net/publication/216864662_A_machine_learning_approach_to_keystroke_dynamics_based_user_authentication.
9. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org>.
10. Lu Xiaofeng, Zhang Shengfei, Yi Shengwei: Continuous authentication by free-text keystroke based on CNN plus RNN (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919302935>.
11. Elgallad, E. A., Ouarda, W., & M., A. (2019). Dense hand-cnn: A novel CNN architecture based on later fusion of neural and wavelet features for identity recognition. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(6). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100647>
12. Harun, N., Dlay, S. S., & Woo, W. L. (2010). Performance of keystroke biometrics authentication system using Multilayer Perceptron neural network (MLP NN). *Y 2010 7th international symposium on communication systems, networks & digital signal processing (CSNDSP 2010)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/csndsp16145.2010.5580334>.
13. Monroe, F., & Rubin, A. D. (2000). Keystroke dynamics as a biometric for authentication. *Future Generation Computer Systems*, 16(4), 351–359. [https://doi.org/10.1016/s0167-739x\(99\)00059-x](https://doi.org/10.1016/s0167-739x(99)00059-x).

References

1. Shadman, R., Wahab, A. A., Manno, M., Lukaszewski, M., Hou, D., & Hussain, F. (2025). Keystroke dynamics: Concepts, techniques, and applications. *ACM Computing Surveys*. <https://www.semanticscholar.org/reader/826113b73fa96eb1d6be90e66ae688c06d086109>.
2. Shanmugapriya, D., & Padmavathi, G. (2010). A Survey of Biometric Keystroke Dynamics: Approaches, *International Journal of Computer Science and Information Security*, 5(1) https://www.researchgate.net/publication/41171720_A_Survey_of_Biometric_keystroke_Dynamics_Approaches_Security_and_Challenges.
3. Rashik Shadman Ahmed Anu Wahab Michael Manno Matthew Lukaszewski Daqing Hou Faraz Hussain (2024). *Keystroke Dynamics: Concepts, Techniques, and Applications* <https://arxiv.org/pdf/2303.04605>.
4. Teh, P. S., Teoh, A. B. J., & Yue, S. (2013). A survey of keystroke dynamics biometrics. *The Scientific World Journal*, 2013, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2013/408280>.
5. Puvirajasingam, K., & Sangeetha, D. (2013). Biometric Authentication using Keystroke Dynamics: A Survey. *IJREAT International Journal of Research in Engineering & Advanced Technology*, 1(5). <http://ijreat.org/Papers%202013/Issue5/IJREATV115079.pdf>.
6. Gaines, R. & Lisowski, William & Press, S. & Shapiro, Norman. (1980). Authentication by Keystroke Timing: Some Preliminary Results. 52.
7. Migdal, D., & Rosenberger, C. (2019). Statistical modeling of keystroke dynamics samples for the generation of synthetic datasets. *Future Generation Computer Systems*, 100, 907–920. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.03.056>.
8. Revett, K., Gorunescu, F., Gorunescu, M., Ene, M., Tenreiro de Magalhães, S., & Santos, H. (2007). A machine learning approach to keystroke dynamics based user authentication. *International Journal of Electronic Security and Digital Forensics*, 1(1), 55–70. https://www.researchgate.net/publication/216864662_A_machine_learning_approach_to_keystroke_dynamics_based_user_authentication.
9. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press. <https://www.deeplearningbook.org>.

10. Lu Xiaofeng, Zhang Shengfei, Yi Shengwei: Continuous authentication by free-text key-stroke based on CNN plus RNN (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919302935>.
11. Elgallad, E. A., Ouarda, W., & M., A. (2019). Dense hand-cnn: A novel CNN architecture based on later fusion of neural and wavelet features for identity recognition. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 10(6). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2019.0100647>
12. Harun, N., Dlay, S. S., & Woo, W. L. (2010). Performance of keystroke biometrics authentication system using Multilayer Perceptron neural network (MLP NN). *У 2010 7th international symposium on communication systems, networks & digital signal processing (CSNDSP 2010)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/csndsp16145.2010.5580334>.
13. Monroe, F., & Rubin, A. D. (2000). Keystroke dynamics as a biometric for authentication. *Future Generation Computer Systems*, 16(4), 351–359. [https://doi.org/10.1016/s0167-739x\(99\)00059-x](https://doi.org/10.1016/s0167-739x(99)00059-x).

Отримано 08.04.2025

UDC 004.03:004.9

Sergiy Kovalenko¹, Oleksii Krasnozhan²

¹PhD student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-23
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kovalenkopt10@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-6993-010X>

²PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>

ResearcherID: G-4623-2014. **Scopus Author ID:** 57190377188

STUDY OF PRIMARY DATA PROCESSING METHODS IN USER IDENTIFICATION SYSTEMS BASED ON KEYSTROKE DYNAMICS

Solving the problem of user identification of computer systems and networks is very relevant, as it allows to increase the level of security, especially when accessing critical data. There are both traditional identification methods (passwords, biometrics) and more modern ones.

This review article examines existing methods of user identification based on the dynamics of keystrokes. In particular, such methods as dynamic analysis of keystroke times, statistical models for recognizing printing patterns, and neural network approaches to user identification are considered.

Dynamic analysis of keystroke times is based on measuring the time characteristics of printing, including the average interval between keystrokes and the duration of holding down keys. These parameters are unique for each user and can be used for authentication.

Statistical models for recognizing printing patterns analyze sequences of characters typed at a certain speed and in a certain order. These models help to detect individual text input patterns, which helps to verify users.

Approaches based on the use of artificial neural networks use deep learning to process large sets of statistical data on keystrokes. These methods allow the development of complex, multi-layered models for analyzing behavioral characteristics of typing, increasing the accuracy of identification.

Thus, we can conclude that none of the methods considered in the article is exhaustive and cannot guarantee 100% correct user identification results. Only by integrating dynamic analysis, statistical modeling and neural network algorithms can we significantly improve authentication security, reducing the risk of unauthorized access and ensuring reliable user identification in information systems.

Key words: keystroke dynamics, biometric authentication, user identification, dynamic timing analysis, statistical recognition models, neural network algorithms, behavioral authentication, machine learning, information security, primary data processing.

Figures: 1. References: 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-303-311](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-303-311)

УДК 004.738.5

Анна Миколаївна Усік¹, Володимир Вікторович Казимир²¹асистент 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-2911-2019²доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vykazymyr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. ResearcherID: Q-2925-2016

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРСПЕКТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

На основі принципів системного підходу та технічного аналізу в роботі представлено метод перспективного оцінювання ефективності функціонування систем Інтернету речей (IoT) у контексті «розумного дому». Запропоновано узагальнений прогностичний підхід до визначення основних техніко-експлуатаційних показників ефективності таких систем, зокрема затримки передачі даних, надійності, масштабованості, енергоспоживання та безпеки. Визначено критерії стабільної та якісної роботи IoT-систем і наведено приклад їх застосування для оцінювання типових сценаріїв створення IoT-системи «розумного дому».

Ключові слова: Інтернет речей; ефективність; техніко-експлуатаційні показники; розумний дім; надійність; оперативність; енергоспоживання, перспективне оцінювання.

Табл.: 2. Бібл.: 26.

Актуальність теми дослідження. Сучасний світ дедалі більше інтегрує цифрові технології у всі сфери життя — від побуту до промисловості. Інтернет речей (IoT) є ключовим напрямом цієї трансформації, оскільки дозволяє створювати інтелектуальні системи, здатні в режимі реального часу збирати, передавати та аналізувати дані. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження ефективності IoT-систем. Оцінка таких систем за технічними та економічними показниками дозволяє забезпечити надійність, безпеку, масштабованість і енергоефективність в умовах зростання кількості підключених пристроїв. Ця тема є актуальною для галузей комп'ютерної інженерії, телекомунікацій, автоматизації, медицини та смартінфраструктури, де використання IoT має стратегічне значення.

Постановка проблеми. Зі зростанням кількості пристроїв у IoT-системах з'являються нові виклики, пов'язані з необхідністю забезпечення їх стабільної роботи, швидкої реакції, енергоефективності та захисту інформації. З огляду на складність розподілених IoT-систем, виникає потреба у нових підходах до їх проєктування, оцінки та керування. Одним із таких підходів є використання когнітивних мап для побудови дорожніх карт розвитку систем, що дозволяє формалізувати знання експертів і приймати зважені рішення [1]. Водночас відсутність уніфікованого підходу до перспективного оцінювання IoT-систем як на етапі проєктування, так і в процесі експлуатації, ускладнює їх впровадження та масштабування в критично важливих сферах. Вирішення цієї проблеми є необхідним для підвищення надійності IoT-рішень, особливо в контексті їх використання у системах реального часу [2; 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективності IoT-систем розглядаються в роботах IEEE, ITU та IETF, присвячених стандартизації, де визначаються допустимі пороги затримки, надійності, пропускну здатності тощо. Зокрема, у дослідженнях щодо протоколів MQTT, CoAP, Zigbee [4; 5; 6] акцентується увага на затримках і надійності передачі даних. У публікаціях компаній Google (Nest), Amazon (Alexa), Xiaomi та Philips Hue зазначено, що для комфортної взаємодії з користувачем затримка не повинна перевищувати 100 мс [7; 8].

Перспективне оцінювання ефективності IoT-систем потребує не лише класичних техніко-експлуатаційних показників, а й інтеграції формальних моделей, когнітивних критеріїв і досвіду користувача. Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити кілька ключових підходів:

1. Формалізовані архітектурні моделі - El-Dosuky та ін. [3] запропонували аналітичну модель IoT-систем, що враховує архітектуру, обрані технології і протоколи для оптимізації продуктивності. Такі моделі дозволяють передбачати узгодженість параметрів: затримку, пропускну здатність, енергоспоживання.

2. Систематичний огляд драйверів ефективності - Shukla та ін. [8] провели систематичний огляд метрик ефективності IoT — latency, throughput, reliability — аналогічно до сучасних вимог у різних прикладних сценаріях.

3. Оцінювання на основі метрологічного підходу - Donatien Koulla Moulla та ін. [9] провели вимірювання 158 IoT-рішень із погляду метрології — надійності, безперервності, безпеки та якості обслуговування. Такий підхід дозволяє стандартизувати оцінювання IoT-рішень у міжгалузевому масштабі.

4. Оцінювання з урахуванням досвіду користувача – згідно з дослідженням Ruoqi Han та ін. [10] показали, що UX-ключові показники є важливими для оцінювання IoT-екосистем з урахуванням рівня інтеграції користувачів/платформ. Аналогічно, дослідження 2024 р. [11] виокремило 43 показники QoS, орієнтованих на забудовників і користувачів IoT-середовищ.

5. Інтеграція стандартів у промисловому IoT - дослідження Industrial IoT [12] акцентує увагу на перспективі інтеграції стеків протоколів та необхідності стандартизації при створенні міжсистемних рішень, де оцінювання ефективності має включати міжплатформену сумісність і надійність компонентів.

Крім того, до ключових трендів перспективного оцінювання IoT систем належать:

- Перехід до формальних моделей для перевірки на різних рівнях IoT-структури — такі моделі, зокрема на основі E-net, дозволяють формалізувати взаємозв'язки між подіями, процесами й об'єктами системи [2; 4; 8];

- Інтеграція когнітивного моделювання (ROI) – розробка дорожніх карт розвитку з урахуванням взаємозв'язків між компонентами екосистеми IoT є перспективним напрямом, зокрема через ECM/CM (Cognitive Mapping) [1];

- Орієнтація на досвід користувача через UX-аналіз і показники [10; 11];

- Включення метрик роботи в IIoT (Industrial Internet of Things - промисловий Інтернет речей.), сумісності стеків, обчислень на краю (edge computing - підхід до обробки даних, за якого обчислення виконуються безпосередньо біля джерела даних, а не в центральному хмарному центрі), що дозволяє зменшити навантаження на хмару і забезпечити обробку в реальному [6; 12; 13].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Хоча окремі показники ефективності IoT-систем добре досліджені, у наукових роботах недостатньо уваги приділено систематизації цих параметрів для перспективного оцінювання становлення та розвитку таких систем. Відсутність комплексного підходу, що охоплює як технічні, так і енергетичні та безпекові показники, ускладнює об'єктивне порівняння і вибір оптимального IoT-рішення для конкретної сфери застосування.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є формалізація та узагальнення ключових показників ефективності IoT-систем, що дозволяє здійснювати якісну оцінку їхнього розвитку в різних сферах застосування. Досягнення цієї мети передбачає вирішення таких задач:

- виокремлення основних технічних метрик,
- аналіз їхніх типових значень і порогів для реальних систем,
- прикладна інтерпретація на основі сценарію «розумного дому».

Кінцевий результат – структурована модель оцінювання, що може бути використана як основа для проектування або вдосконалення IoT-систем.

Виклад основного матеріалу. Системи Інтернету речей (IoT) характеризуються великою кількістю взаємопов'язаних пристроїв, які збирають, передають і обробляють дані в режимі реального часу. Для оцінки їхньої ефективності використовуються специфічні показники, що охоплюють як технічні, так і економічні аспекти, визначені насамперед серією стандартів:

- **IEEE 802.15.4** — стандарт бездротового обміну даними для сенсорних мереж [14];
- **IEEE 2413-2019** — архітектура Інтернету речей [15];
- **ISO/IEC 30141:2018** — довідкова архітектура IoT [16];
- **IETF RFC 7252** — специфікація CoAP [17];
- **IETF RFC 8967** — специфікація MQTT v5.0 [18];
- **ITU-T Y.2060** — загальна модель і термінологія IoT [19];
- **ITU-T Y.4208** — міжмережевість IoT [20];
- **ISO/IEC 25010:2011** — модель якості ПЗ (надійність, доступність тощо) [21];
- **ISO/IEC 27701:2019** — розширення ISO/IEC 27001 щодо конфіденційності [22];
- **ISO/IEC 29192** — стандарти криптографії для обмежених пристроїв [23];
- **ISO/IEC 17025:2017** — вимоги до калібрування та достовірності вимірювань [24].

Відповідно до перелічених стандартів, а також практик впровадження показники ефективності IoT-систем можуть бути структуровані таким чином:

1. **Надійність системи (Reliability).** Відповідні стандарти: IEEE 1451, ITU-T Y.2060, ISO/IEC 25010:

- 1.1. Відсоток безвідмовної роботи за визначений період часу ($\text{Availability} \geq 99.9\%$) [21].
- 1.2. Середній час між відмовами (MTBF - Mean Time Between Failures).
- 1.3. Виявлення та обробка збоїв [15].
- 1.4. Механізми виявлення та відновлення після збоїв (redundancy, failover) [16].

2. **Продуктивність передачі даних (Performance Metrics).** Відповідні стандарти: IETF RFC 8200 (IPv6), RFC 7252 (CoAP), RFC 8446 (TLS 1.3), ITU-T Y.4000, IEEE 802.15.4:

- 2.1 Пропускна здатність (Throughput) [18] - Вимірюється в біт/с; залежить від використаних протоколів (наприклад, MQTT, CoAP, Zigbee).
- 2.2 Затримка (Latency) - Час передачі даних від датчика до обробника [19].
- 2.3 Джитер (Jitter) - Варіативність затримок між пакетами.
- 2.4 Доступність (Availability) – Відсоток часу, коли система перебуває в робочому стані, наприклад, $> 99,9\%$ [21].

3. **Масштабованість (Scalability).** Відповідні стандарти: ITU-T Y.2060, IEEE P2413, IETF RFC 6924:

- 3.1 Підтримка великої кількості одночасно підключених пристроїв (від 10 до 10 000+) [16].
- 3.2 Підтримка зростання без зміни архітектури [19].
- 3.3 Інтероперабельність через стандартизовані протоколи MQTT, CoAP [17; 18].

4. **Енергоспоживання (Energy Efficiency).** Відповідні стандарти: IEEE 802.15.4, IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow), ETSI EN 303 204:

- 4.1 Рівень енергоспоживання на одиницю обробки інформації [14].
- 4.2 Споживання енергії в активному режимі та у стані очікування [4].
- 4.3 Енергоефективні мережі — LoRa, Zigbee, 802.15.4e [14; 16].

5. **Безпека та конфіденційність (Security and Privacy).** Відповідні стандарти: ISO/IEC 27001, ISO/IEC 29100, IETF RFC 6280, RFC 8576 (IoT Security Considerations):

- 5.1 Захист каналів зв'язку (TLS, DTLS) [17; 22];
- 5.2 Аутентифікація пристроїв — CBOR Web Token (RFC 8392) [25].
- 5.3 Криптографія для обмежених пристроїв (ECC, DSA) [23].
- 5.4 Захист персональних даних (GDPR/ISO 27701) [22].

6. **Точність та достовірність даних (Accuracy and Data Quality).** Відповідні стандарти: IEEE 1451.5, ISO/IEC 25012 (Data Quality Model):

- 6.1 Калібрування сенсорів [24];
- 6.2 Верифікація та фільтрація даних (noise filtering) [15];
- 6.3 Нормалізація сигналів [15].

7. Адаптивність та гнучкість системи (Flexibility). Відповідні стандарти: IEEE P2413, ITU-T Y.3011 :

7.1 Можливість динамічного оновлення прошивки (OTA).

7.2 Інтероперабельність: підтримка різних протоколів (MQTT, CoAP, LwM2M) [17, 18].

7.3 Придатність до модифікацій без повної реконфігурації мережі [15; 26].

Що стосується систем типу «розумний дім», то тут є свої особливості, які мають бути враховані. Так, компанії Philips Hue, Google Nest, Amazon Alexa, Xiaomi Smart Home часто вказують вимоги до швидкості реакції системи — менш як 100 мс, особливо для інтерактивного керування [17]. Люди сприймають затримку понад ~100 мс як "відчутну". Якщо світло не загоряється миттєво після клацання або команди, це сприймається як помилка. Безпека — ще критичніша: сигнал тривоги або блокування дверей має відбутись негайно. Тож, для таких систем доцільно розширити розгляд низки важливих показників, які у попередньому викладі були окреслені лише на рівні загального переліку. Зокрема, йдеться про такі аспекти, як енергоспоживання, безпека та конфіденційність, а також точність і достовірність даних.

Енергоспоживання є ключовим показником IoT-систем, особливо тих, що працюють від автономних джерел живлення (батарей або акумуляторів). Вона визначає тривалість безперервної роботи пристроїв та впливає на загальну експлуатаційну вартість системи. За стандартами IEEE 802.15.4, IEEE 802.11ah та ETSI EN 303 204, важливо оцінювати не лише абсолютне споживання енергії в активному та пасивному режимах, а й ефективність енергоспоживання на одиницю переданих або оброблених даних [14; 16].

Типові значення енергоспоживання для сенсорних пристроїв у системах «розумного дому» не повинні перевищувати 100 мВт·год, що дозволяє забезпечити багаторічний термін роботи без заміни джерел живлення. Використання енергоефективних протоколів (LoRa, Zigbee, IEEE 802.15.4e) сприяє зниженню енергоспоживання, одночасно підтримуючи необхідний рівень продуктивності [14].

Недостатня енергоефективність призводить до частих замін батарей, підвищення експлуатаційних витрат і ризику перебоїв у роботі системи, що знижує її загальну ефективність.

Безпека та конфіденційність є критично важливими для забезпечення надійної роботи IoT-систем та захисту даних користувачів. Відсутність належних механізмів безпеки може призвести до несанкціонованого доступу, втрати або спотворення даних, а також до втрати контролю над пристроями [17; 22].

Основні стандарти ISO/IEC 27001, ISO/IEC 29100 та RFC 6280 регламентують вимоги до захисту каналів зв'язку (TLS, DTLS), аутентифікації пристроїв (CBOR Web Token) та криптографії (ECC, DSA) для ресурсно обмежених пристроїв [23; 25]. Захист персональних даних, зокрема у відповідності до GDPR/ISO 27701, підвищує довіру користувачів і є законодавчою вимогою в багатьох країнах.

Типові рівні шифрування, що застосовуються в IoT, включають AES-128, TLS, WPA2, які забезпечують достатній рівень безпеки для більшості застосувань. Важливість безпеки оцінюється як критична, оскільки її порушення може призвести до серйозних фінансових та репутаційних втрат.

Точність та достовірність даних є важливими для забезпечення коректності рішень, прийнятих на основі IoT-систем. Відхилення або шум у зібраних даних можуть призвести до помилкових висновків та зниження ефективності системи [15; 24].

Стандарти IEEE 1451.5 та ISO/IEC 25012 визначають методи калібрування сенсорів, верифікації та фільтрації даних (noise filtering), а також нормалізації сигналів, що дозволяють підвищити якість інформації. Типові вимоги передбачають похибку не більше як 5 %, що є достатнім для більшості прикладних сценаріїв у «розумному домі». Висока точність даних підвищує довіру до системи та дозволяє більш ефективно використовувати отриману інформацію для автоматизації і прийняття рішень.

На основі узагальнення стандартів, типових технічних метрик та критичності застосування, пропонується базова структурована модель оцінювання ефективності IoT-систем, представлена у вигляді табл. 1.

Таблиця 1 – Базова структурована модель оцінювання ефективності IoT-систем

Властивості	Показники (метрики)	Одиниця виміру	Типові значення	Важливість
Надійність	Безвідмовність, середній час між відмовами, виявлення/обробка збоїв	% або MTBF (годин)	> 99,9% або > 10 000 год	Висока
Продуктивність передачі	Пропускна здатність, затримка, джитер, доступність	Кбіт/с, мс, %	100 Кбіт/с – 10 Мбіт/с; <100 мс; >99,9%	Критична для систем реального часу
Масштабованість	Кількість підключених пристроїв, сумісність протоколів	Кількість пристроїв	> 10 000 пристроїв	Висока
Енергоспоживання	Потужність у режимі очікування/активному, енергоефективні технології	мВт, Вт·год	< 100 мВт/год (для сенсорів)	Важлива для IoT-батарей
Безпека та конфіденційність	Шифрування, автентифікація, захист персональних даних	Якісна оцінка / тип криптографії	TLS, DTLS, AES-128, ECC	Критично важлива
Точність та достовірність	Калібрування, фільтрація шуму, нормалізація	% похибки	< 5%	Висока
Адаптивність та гнучкість	ОТА-оновлення, підтримка протоколів, гнучкість конфігурації	Кількість змін / підтримка ОТА	До 5 змін без перебудови, ОТА доступне	Висока

Ця модель включає сім ключових груп показників, кожна з яких характеризує окрему функціональну складову системи, і може слугувати основою для перспективного оцінювання відповідності IoT-системи цільовим критеріям у прикладних доменах.

Для кращого розуміння практичного застосування техніко-експлуатаційних показників ефективності функціонування IoT-систем у контексті «розумного дому», нижче наведено приклад (табл. 2) конкретних граничних значень та відповідних стандартів, що регламентують ці показники. Ці критерії дозволяють забезпечити оцінити стабільність, масштабованість та енергоефективність систем, які функціонують у реальному часі.

Таблиця 2 – Приклад застосування моделі оцінки IoT-системи «Розумний дім»

Показник	Типове значення	Результат системи	Оцінка
Затримка	< 100 мс	140мс	-
Надійність	> 99,9%	99,95%	+
Продуктивність передачі	100 Кбіт/с – 10 Мбіт/с	1,5 Мбіт/с	+
Енергоспоживання сенсорів	< 100 мВт·год	120 мВт·год	-
Безпека	Відповідає стандартам	TLS+ECC+CBOR Token	+
Точність	< 5%	±3%	+
Адаптивність	Мінімум 2, ОТА підтримка	ОТА доступне, 3 протоколи	+

Таким чином, система відповідає 5 із 7 критичних показників. Затримка перевищує межі реального часу, а енергоспоживання сенсорів вимагає оптимізації. Результат може бути поданий як карта відповідності, що слугує вхідними даними для прийняття рішень щодо модернізації або масштабування.

Для практичного використання запропонованої вище моделі перспективного оцінювання ефективності IoT-систем, у тому числі із застосуванням когнітивних карт, пропонується такий алгоритм:

1. **Ідентифікація системи.** Визначити межі аналізу: тип IoT-системи, кількість пристроїв, сферу застосування (eHealth, Smart Home, IIoT тощо).

2. **Отримання вихідних технічних характеристик.** Перевірити шляхом математичного моделювання фактичні значення основних метрик (надійність, продуктивність передачі, енергоспоживання, безпека, точність, адаптивність тощо).

3. **Зіставлення з критеріями моделі.** Порівняти отримані показники з типовими/еталонними значеннями із табл. 2.

4. **Оцінка відповідності.** Для кожної метрики визначити: відповідає / не відповідає (наприклад, кольором або балами).

5. **Візуалізація відповідності.** Побудувати діаграму (наприклад, radar chart або матрицю відповідності) для візуального аналізу.

6. **Формування висновку.** На основі кількості відповідностей (наприклад, ≥ 5 із 7 – прийнятна ефективність) зробити висновок про доцільність використання, масштабування або вдосконалення системи.

7. **Рекомендації.** Визначити метрики, які потребують покращення, та можливі заходи (заміна сенсорів, оптимізація протоколу, перехід на edge-обчислення тощо).

Висновки. У роботі представлено систематизований підхід до оцінювання ефективності IoT-систем з урахуванням ключових техніко-експлуатаційних показників: надійності, затримки, пропускну здатності, масштабованості, енергоспоживання, безпеки, точності та гнучкості. Для кожного з параметрів визначено типові значення, релевантні одиниці виміру, критичні значення та відповідні міжнародні стандарти (наприклад, ISO/IEC 25010, ITU-T Y.2060, IEEE 802.15.4, IEEE P2413).

Особливу увагу приділено системам реального часу на прикладі «розумного дому», де ефективність значною мірою залежить від дотримання мінімальних затримок, високої надійності та здатності до динамічної адаптації.

Також проаналізовано сучасні підходи до перспективного оцінювання, які доповнюють класичні метрики когнітивними критеріями, формалізованими моделями, показниками досвіду користувача (UX) та міжплатформенною сумісністю. Такий підхід дозволяє здійснювати більш точне планування розвитку IoT-систем та оцінювати їхню ефективність за різними сценаріями функціонування.

Крім того, у роботі запропоновано базову структуровану модель оцінювання ефективності IoT-систем та методичний алгоритм її практичного використання. Запропоновані приклади демонструють можливість формалізованого порівняння фактичних характеристик системи з нормативними показниками, що створює підґрунтя для прийняття рішень щодо оптимізації або масштабування архітектури. Такий підхід підвищує об'єктивність технічного аудиту та сприяє підготовці адаптивних стратегій розвитку IoT-рішень у різних предметних галузях. Описана модель оцінювання може бути розширена з урахуванням специфіки конкретних галузей (наприклад, промисловість, агросектор, охорона здоров'я) і використовуватися як частина інструментарію проєктування, аудиту або вдосконалення IoT-систем.

Список використаних джерел

1. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation cognitive maps for extended technology roadmapping in iot. In *2019 10th IEEE international conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: Technology and applications (IDAACS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/idaacs.2019.8924442>
2. Klima, M., Hanzálek, I., & Švéda, P. (n.d.). *Quality and reliability metrics for IoT systems: A consolidated view*. Abertay Research Portal. <https://rke.abertay.ac.uk>

3. Martinsson Bonde, J., Kokkolaras, M., Andersson, P., Panarotto, M., & Isaksson, O. (2023). A similarity-assisted multi-fidelity approach to conceptual design space exploration. *Computers in Industry*, 151, 103957. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103957>.
4. Ray, P. P., & Chatterjee, S. (2020). *IoT reliability: A review leading to 5 key research directions*. ResearchGate.
5. El-Dosuky, M., El-Bakry, H., & Bahgat, A. (2023). Enhancing IoT performance in wireless and mobile networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102755>.
6. Villalba, L. J., Naranjo, P. A., & Casilari, E. (2020). Quality characteristics in IoT systems: Learnings from an industry survey and workshop. *Software Quality Journal*.
7. Al-Turjman, F., Mostarda, L., & Giudice, G. D. (2020). *IoT reliability: A review leading to 5 key research directions*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/343512706_IoT_reliability_a_review_leading_to_5_key_research_directions.
8. Shukla, P. K., Jaiswal, A., Sharma, A., & Park, J. H. (2020). *A systematic review on performance evaluation metric selection for various IoT applications*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2007.12238>.
9. Moulla, D. K., Mnkandla, E., & Abran, A. (2023). Evaluation of IoT measurement solutions from a metrology perspective. *Computer Systems Science and Engineering*, 47(2), 2455–2479. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.039736>.
10. Han, R., Huang, R., & Wang, Y. (2024). Performance evaluation in an IoT-based ecosystem — A field study approach. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4967215>.
11. Almalki, A., & Mourshed, M. (2024). Occupant-centric key performance indicators for intelligent buildings: A systematic review. *Building and Environment*, 246, 111435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111435>.
12. Luo, Y., & Yu, S. (2023). Industrial Internet of Things: Standardization, challenges and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 141, 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.03.006>.
13. Villalba, L. J., Naranjo, P. A., & Casilari, E. (2020). Quality characteristics in IoT systems: Learnings from an industry survey and workshop. *SpringerLink*. <https://link.springer.com>.
14. IEEE. (2020). *IEEE 802.15.4: IEEE standard for low-rate wireless networks*. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html
15. IEEE. (2019). *IEEE 2413-2019: IEEE standard for an architectural framework for the Internet of Things*. <https://standards.ieee.org/standard/2413-2019.html>.
16. International Organization for Standardization. (2018). *ISO/IEC 30141:2018 – Інтернет речей (IoT): Референтна архітектура*.
17. Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). *The constrained application protocol (CoAP) (RFC 7252)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>.
18. Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2020). *MQTT version 5.0 (RFC 8967)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8967>.
19. International Telecommunication Union. (2012). *ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of Things*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en>.
20. International Telecommunication Union. (2019). *ITU-T Y.4208: Requirements and capabilities for interworking of IoT*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4208-201908-I/en>.
21. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 – Системна та програмна інженерія: Якісні вимоги та оцінювання (SQuaRE)*.
22. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2019). *ISO/IEC 27701:2019 – Розширення до ISO/IEC 27001 та ISO/IEC 27002 для управління конфіденційною інформацією*.
23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (n.d.). *ISO/IEC 29192 – Легковагова криптографія*.
24. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 – Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій*.
25. Jones, M., & Wahlstroem, H. (2018). *CBOR Web Token (CWT) (RFC 8392)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8392>.

26. International Telecommunication Union. (2012). *ITU-T Y.3011: Framework of networked vehicle platforms based on cloud computing*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3011-201212-I/en>.

References

1. Usik, A., & Kazymyr, V. (2019). Evaluation cognitive maps for extended technology roadmapping in iot. In *2019 10th IEEE international conference on intelligent data acquisition and advanced computing systems: Technology and applications (IDAACS)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/idaacs.2019.8924442>.
2. Klima, M., Hanzálek, I., & Švéda, P. (n.d.). *Quality and reliability metrics for IoT systems: A consolidated view*. Abertay Research Portal. <https://rke.abertay.ac.uk>.
3. Martinsson Bonde, J., Kokkolaras, M., Andersson, P., Panarotto, M., & Isaksson, O. (2023). A similarity-assisted multi-fidelity approach to conceptual design space exploration. *Computers in Industry*, 151, 103957. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103957>.
4. Ray, P. P., & Chatterjee, S. (2020). *IoT reliability: A review leading to 5 key research directions*. ResearchGate.
5. El-Dosuky, M., El-Bakry, H., & Bahgat, A. (2023). Enhancing IoT performance in wireless and mobile networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102755>.
6. Villalba, L. J., Naranjo, P. A., & Casilari, E. (2020). Quality characteristics in IoT systems: Learnings from an industry survey and workshop. *Software Quality Journal*.
7. Al-Turjman, F., Mostarda, L., & Giudice, G. D. (2020). *IoT reliability: A review leading to 5 key research directions*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/343512706_IoT_reliability_a_review_leading_to_5_key_research_directions.
8. Shukla, P. K., Jaiswal, A., Sharma, A., & Park, J. H. (2020). *A systematic review on performance evaluation metric selection for various IoT applications*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2007.12238>.
9. Moulla, D. K., Mnkandla, E., & Abran, A. (2023). Evaluation of IoT measurement solutions from a metrology perspective. *Computer Systems Science and Engineering*, 47(2), 2455–2479. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.039736>.
10. Han, R., Huang, R., & Wang, Y. (2024). Performance evaluation in an IoT-based ecosystem — A field study approach. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4967215>.
11. Almalki, A., & Mourshed, M. (2024). Occupant-centric key performance indicators for intelligent buildings: A systematic review. *Building and Environment*, 246, 111435. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111435>.
12. Luo, Y., & Yu, S. (2023). Industrial Internet of Things: Standardization, challenges and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 141, 165–182. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.03.006>.
13. Villalba, L. J., Naranjo, P. A., & Casilari, E. (2020). Quality characteristics in IoT systems: Learnings from an industry survey and workshop. *SpringerLink*. <https://link.springer.com>.
14. IEEE. (2020). *IEEE 802.15.4: IEEE standard for low-rate wireless networks*. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html
15. IEEE. (2019). *IEEE 2413-2019: IEEE standard for an architectural framework for the Internet of Things*. <https://standards.ieee.org/standard/2413-2019.html>.
16. International Organization for Standardization. (2018). *ISO/IEC 30141:2018 – nternet of Things (IoT) – Reference architecture*.
17. Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2014). *The constrained application protocol (CoAP) (RFC 7252)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7252>.
18. Hunkeler, U., Truong, H. L., & Stanford-Clark, A. (2020). *MQTT version 5.0 (RFC 8967)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8967>.
19. International Telecommunication Union. (2012). *ITU-T Y.2060: Overview of the Internet of Things*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I/en>.
20. International Telecommunication Union. (2019). *ITU-T Y.4208: Requirements and capabilities for interworking of IoT*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4208-201908-I/en>.
21. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2011). *ISO/IEC 25010:2011 – Systems and Software Engineering: Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)*.

22. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2019). *ISO/IEC 27701:2019 – Extension to ISO/IEC 27001 and ISO/IEC 27002 for the management of confidential information*.

23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (n.d.). *ISO/IEC 29192 – Lightweight cryptography*.

24. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.

25. Jones, M., & Wahlstroem, H. (2018). *CBOR Web Token (CWT) (RFC 8392)*. Internet Engineering Task Force (IETF). <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8392>.

26. International Telecommunication Union. (2012). *ITU-T Y.3011: Framework of networked vehicle platforms based on cloud computing*. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3011-201212-I/en>.

Отримано 11.06.2025

UDC 37:004.738

Anna Usik¹, Volodymyr Kazymyr²

¹Assistant 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

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vykazymyr@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** Q-2925-2016

PERFORMANCE INDICATORS FOR PROSPECTIVE EVALUATION OF INTERNET OF THINGS SYSTEMS

Rapid development and integration of the Internet of Things (IoT) into various domains of human activity underscores the growing importance of evaluating the operational efficiency of such systems. Modern smart environments, industrial automation platforms, and intelligent infrastructures rely heavily on networks of interconnected devices and sensors that generate, exchange, and process large volumes of data. Given the wide applicability of IoT and the continuous growth in the number of connected devices, ensuring their efficiency and reliability becomes critically important. The relevance of this research is driven by the need to define comprehensive, technically grounded, and practically applicable performance indicators that can guide the design, deployment, and optimization of IoT systems.

This study addresses the problem of identifying, systematizing, and structuring key performance indicators for IoT systems to ensure their suitability for specific use cases. Current challenges include balancing throughput, energy efficiency, latency, scalability, reliability, and data accuracy. Without a structured evaluation framework, it becomes difficult to ensure that IoT systems comply with functional and quality-of-service requirements, particularly in critical domains such as healthcare, infrastructure, and smart homes.

The aim of this research is to formalize and generalize the key technical and operational metrics that determine the efficiency of IoT systems. These include reliability, latency, energy consumption, scalability, security, and data quality. A structured model of performance evaluation is proposed, incorporating typical threshold values, measurement units, and relevant international standards. Additionally, the study emphasizes the use of formalized modeling tools—such as cognitive maps and E-net models—for enhanced analysis and decision-making in distributed IoT environments.

The methodology combines the analysis of international standards, scientific literature, and practical implementations in real-world scenarios. A structured classification of performance indicators is presented, supported by a practical example of a smart home system. Moreover, a methodical algorithm is proposed for the systematic assessment of IoT performance, allowing stakeholders to compare actual system characteristics against standard benchmarks.

The results of this study show that the most impactful indicators for IoT efficiency include reliability, latency, energy consumption, and data accuracy. These metrics significantly influence system responsiveness, service continuity, and data integrity. The proposed model and algorithm can be used as a methodological basis for technical audits, scenario-based planning, and the development of adaptive and scalable IoT ecosystems. The findings contribute to both the scientific understanding and the practical evaluation of efficiency in IoT systems and may serve as a foundation for future research and development in this field.

Keywords: Internet of Things; efficiency; technical and operational indicators; smart home; reliability; responsiveness; energy consumption; prospective evaluation.

Table: 2. References: 26.

Олексій Сергійович Кондус¹, Олексій Миколайович Ткаченко²

¹магістр

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: oleksii.kondus@knu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2514-6196>. ResearcherID: NLN-6147-2025

²кандидат технічних наук, доцент кафедри теорії та технології програмування

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: otkachenko@knu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9514-516X>. ResearcherID: U-3613-2017

МОДУЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНОЇ ПІДТРИМКИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розробка програмного забезпечення включає ряд рутинних процесів, які потребують різної кількості ресурсів, залежно від специфіки задач. У багатьох випадках це впливає на продуктивність команди і дотримання графіку роботи. У статті запропоновано програмне рішення – Smart AI Code Assistant – розширення для Visual Studio Code, що забезпечує прискорення розробки шляхом автоматизації деяких рутинних процесів за допомогою AI-моделей, зокрема, GPT, Claude, Gemini, Grok та DeepSeek. На відміну від існуючих рішень, розроблений модуль дозволяє вибрати модель залежно від задачі, проаналізувати код на відповідність принципам S.O.L.I.D., інтегрувати функції генерування документації, тестів, рефакторингу та пояснення логіки коду в єдиному інтерфейсі. Експериментально підтверджено ефективність моделей у задачі рефакторингу коду.

Ключові слова: автоматизація розробки; штучний інтелект; S.O.L.I.D.; рефакторинг; документація коду; AI-моделі; Visual Studio Code.

Рис.: 12. Табл.: 1. Бібл.: 12.

Актуальність теми дослідження. В умовах високої конкуренції на ринку ІТ швидкість виходу продукту і якість програмного забезпечення (ПЗ) є ключовими факторами успіху. При цьому розробники часто стикаються з великим навантаженням через рутинні завдання, такі як створення документації, рефакторинг коду, написання тестів та перевірки коду на відповідності принципам S.O.L.I.D., що може займати значну частину їхнього часу. Згідно з дослідженням [1], рутинні завдання, такі як налагодження коду, можуть займати до 50 % часу розробника, що значно уповільнює процеси розробки.

Постановка проблеми. Наявні інструменти автоматизації, такі як GitHub Copilot, Cody та Tabnine, частково вирішують ці проблеми, однак мають обмеження: вони не забезпечують повноцінної перевірки відповідності принципам S.O.L.I.D., не дозволяють гнучко обирати моделі штучного інтелекту (ШІ) для різних задач і недостатньо інтегровані в середовище розробки для зручного використання результатів. Це призводить до зниження продуктивності розробників і уповільнення випуску продуктів, що підкреслює необхідність розробки інструменту автоматизації, який би інтегрував кілька ШІ-моделей, підтримував принципи якісного програмування та забезпечував зручну взаємодію в середовищі розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням застосування ШІ у розробці ПЗ присвячено значну кількість наукових праць і оглядових досліджень, зокрема [1–7]. Так, у роботі S. Peng та співавторів [1] на основі емпіричних даних з GitHub Copilot досліджено вплив ШІ-асистентів на продуктивність розробників. Автори відзначають зростання ефективності при виконанні рутинних завдань, що підтверджує актуальність використання ШІ-технологій у програмуванні. Огляд екосистеми інструментів для розробників з елементами ШІ наведено в публікації компанії Scott Logic [2], де систематизовано наявні рішення і виявлено ключові напрями розвитку галузі. Подібну тематику розкрито і в огляді N. Upadhyaya [3], в якому описано основні підходи до інтеграції ШІ у життєвий цикл розробки програмного забезпечення. У дослідженні M. Alenezi та M. Akour [4] розглянуто сучасні практики впровадження ШІ в інженерію ПЗ та окреслено перспективи подальших інновацій. Огляд публікацій за результатами досліджень, пов'язаних із використанням ШІ у цій сфері, подано у роботі P. Kokol [5]. Окрему увагу приділено застосуванню ШІ у класичних моделях розробки, що розглядається у статті R.

Sarfraz і T. Riaz [6]. У роботі S. Shankar та S. Chaudhari [7] запропоновано фреймворк автоматизації фаз життєвого циклу ПЗ із використанням технологій ШІ і машинного навчання, що також свідчить про високу зацікавленість наукової спільноти в темі. Очевидно, напрям використання ШІ у розробці ПЗ активно розвивається, і основними цілями досліджень і розробок підвищення продуктивності, автоматизація рутинних процесів, покращення якості програмного коду.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Новизна розробленого модуля полягає насамперед у гнучкості використання ШІ: на відміну від більшості існуючих рішень, які базуються на одній фіксованій моделі, розроблений Smart AI Code Assistant дозволяє користувачеві самостійно обирати модель для кожного конкретного завдання. Підтримуються GPT, Claude, Gemini, Grok та Deepseek, що дає можливість варіювати вибір залежно від вимог до швидкості, точності або вартості. Це особливо корисно у випадках, коли певна модель гірше справляється з конкретним типом задач – користувач може миттєво перемикнути на іншу, не змінюючи інтерфейс або середовище розробки.

Ще однією важливою особливістю розробки є підтримка перевірки коду на відповідність принципам S.O.L.I.D. – із поясненням кожного порушення та пропозиціями щодо його усунення. Така функціональність практично не представлена в аналогічних інструментах і значно підвищує якість архітектури коду.

Модуль об'єднує в собі низку ключових функцій: генерування документації, рефакторинг, створення юніт-тестів, пояснення логіки у вигляді коментарів, генерування коду за сигнатурою методу, а також S.O.L.I.D.-аналіз.

Метою дослідження є розробка програмного модуля, який дозволяє, використовуючи популярні ШІ-моделі, автоматизувати ряд рутинних процесів, таких як документування коду, рефакторинг, перевірка на відповідність принципам S.O.L.I.D., генерування модульних тестів та інших функцій для підвищення продуктивності розробників. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- Провести аналіз існуючих підходів інтелектуальної автоматизації етапів життєвого циклу розробки ПЗ;
- Дослідити можливості ШІ-моделей (ChatGPT, Claude, Gemini, DeepSeek, Grok) у задачах аналізу, оптимізації та генерування програмного коду;
- Розробити методи автоматизованого контролю на відповідність коду принципам S.O.L.I.D.;
- Розробити модуль автоматизованого генерування документації, рефакторингу, модульних тестів, генерування коду за сигнатурою методу, додавання пояснень до коду у вигляді коментарів та перевірки відповідності принципам S.O.L.I.D.;
- На прикладі задачі рефакторингу провести дослідити та оцінити ефективність розробленого інструментарію з погляду прискорення розробки і точності генерування (рівень помилок) для різних моделей.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації модуля використано мову програмування JavaScript та платформу Node.js, що дозволило створити легке й масштабоване рішення, інтегроване в популярне середовище розробки.

На етапі проєктування архітектури модуля визначено ключові компоненти: модуль інтеграції з API ШІ-моделей, ядро для обробки запитів користувача (extension.js), компоненти для аналізу коду та генерування результатів, а також інтерфейс для вибору ШІ-моделі. Для інтеграції з ШІ-моделями використано OpenAI API для взаємодії з ChatGPT, а також додано підтримку альтернативних моделей, таких як Claude, Gemini, DeepSeek і Grok, що забезпечило гнучкість у виборі інструменту залежно від задачі. Наприклад, для аналізу S.O.L.I.D. може обиратися Claude через його високу точність, а для швидкого генерування коду – Gemini.

Для аналізу синтаксичної структури коду застосовано бібліотеку *tree-sitter*, яка забезпечує створення абстрактного синтаксичного дерева (AST) для таких мов програмування, як JavaScript, Java та Python. Це дозволило модулю точно ідентифікувати структуру коду перед обробкою. Бібліотека *openai* відповідає за взаємодію з API AI-моделей, а *tiktoken* використовувалася для оптимізації обробки токенів, що зменшило витрати на запити до API. Якщо кількість токенів у коді користувача перевищує максимальний ліміт, який встановлюється в коді програми (наприклад, `const GEMINI_2_5_PRO_LIMIT = 65500;`), то модуль пропонує користувачу виділити меншу частину коду для обробки, запобігаючи обрізанню важливих фрагментів. Конфігураційні параметри, зокрема, API-ключі, зберігалися у файлі `.env` за допомогою бібліотеки *dotenv*, що забезпечило безпечне управління чутливими даними, виключаючи їх із системи контролю версій.

Основні функції модуля реалізовано через створення спеціалізованих підмодулів, кожен із яких відповідає конкретному аспекту автоматизації розробки ПЗ.

Генерування документації коду здійснюється шляхом аналізу виділеного фрагмента коду за допомогою ШІ-моделей, які генерують відповідні коментарі для різних мов програмування. Для уникнення небажаних змін у логіці чи структурі коду застосовується безпечний підхід: отримані дані від ШІ очищаються від супутнього форматування, перевіряються на наявність небезпечних функцій (`eval`, `exec` тощо) та обробляються через побудову AST. Це дерево дозволяє виділити лише коментарі документації, порівняти їх зі структурою оригінального коду та інтегрувати в потрібні місця без порушення функціональності. Результат відображається у відповідному вікні користувацького інтерфейсу для перегляду й підтвердження.

Для створення документації використано *zero-shot* промпти, які чітко вказують формат виводу, наприклад, *JSDoc*, *Google-style docstrings*, *Javadoc*, залежно від мови програмування. Промпти містять обмеження на збереження оригінального коду та повернення лише задокументованого результату без додаткового форматування. Нижче подано приклад запиту для задачі документування коду для мов `python` та `java`.

```
const documentationPrompts = {  
  python: "Generate detailed documentation for the following Python code while keeping the  
original code unchanged. Use Google-style docstrings and place them directly above the corresponding  
functions or classes. Each docstring should include a concise description, parameter explanations  
(Args:), return values (Returns:). Return only the documented code without any additional text or  
Markdown wrappers.",  
  java: "Produce detailed documentation for the following Java code without changing the original  
code. Add the documentation as Javadoc comments above the relevant classes, methods, or fields.  
Include descriptions of the class/method purpose, parameters, return types, exceptions, and examples.  
Return only the documented code without any additional text or Markdown wrappers.",  
  default: "Generate detailed documentation for the following code without modifying the original  
code. Add the documentation as comments above the relevant sections, including a description of its  
purpose, inputs, outputs, and a simple usage example. Return only the documented code without any  
additional text or Markdown wrappers."  
};
```

Рефакторинг коду. Процес ініціюється через команду, яка визначає контекст коду та відправляє його до ШІ для аналізу і покращень, таких як розбиття на логічні блоки чи використання потрібних конструкцій і шаблонів. При цьому система автоматично обирає відповідну ШІ-модель залежно від обсягу коду. Користувач може затвердити зміни, скасувати їх або запросити альтернативний варіант, що додає гнучкості щодо різних потреб розробки.

Промпти для рефакторингу орієнтовані на покращення читабельності, продуктивності та відповідності стандартам, наприклад, ES6+ для JavaScript, PEP 8 для Python. Використовується підхід zero-shot із обмеженнями на збереження функціональності та структури. Убезпечення від появи небажаних функцій, наприклад, eval чи exec, враховується при формуванні звернення до ШІ-рушія.

Генерування тестів та їх інтеграція у проєкт передбачає створення юніт-тестів на основі аналізу коду за допомогою ШІ, з урахуванням типових і граничних випадків. Після генерування тестів користувачу пропонується обрати місце їх збереження, включаючи можливість створення нового файлу чи використання існуючого. Важливою особливістю є автоматичне злиття з уже наявними тестами: система виконує аналіз поточного вмісту тестового файлу, парсить код за допомогою бібліотеки *tree-sitter*, виявляє наявні тестові функції або методи, порівнюючи їхні назви чи описи зі згенерованими, і додає лише ті нові тести, які ще не присутні у файлі. Таким чином, уникається дублювання, а нові тести інтегруються у логічно відповідні місця, з урахуванням структури коду та синтаксису конкретної мови програмування. Це дозволяє розширювати покриття тестів без конфліктів і додаткових зусиль.

Промпти для створення юніт-тестів (Jest/Mocha для JavaScript, unittest/pytest для Python, JUnit для Java) включають вимоги до покриття основної функціональності, граничних випадків і обробки помилок.

Аналіз коду на відповідність принципам S.O.L.I.D. забезпечує оцінку коду за ключовими принципами об'єктно-орієнтованого дизайну, виявляючи потенційні порушення. Процес включає автоматичну перевірку при зміні чи відкритті файлу з урахуванням оптимального навантаження, а також ручне ініціювання детального аналізу. Результати відображаються в редакторі з підкресленням проблемних ділянок і короткими рекомендаціями, доступними при наведенні курсору. Користувач може запросити покрокові інструкції для виправлення або отримати автоматично запропоновані рішення, які інтегруються як швидкі дії, що значно полегшує покращення якості коду.

Промпти реалізують трирівневий підхід: аналіз із виводом порушень у JSON-форматі, рекомендації щодо їх усунення та автоматичне генерування відрефактореного коду з обмеженнями на збереження залежностей і фокусом на цільовому класі.

Реалізація вибору ШІ-моделі здійснена через інтерфейс у Visual Studio Code, де користувач обирає модель: ChatGPT, Claude, Gemini, DeepSeek або Grok у веб-перегляді, налаштовуючи її для кожної задачі.

Особливу увагу приділено оптимізації продуктивності та стабільності. Проведено ітерації тестування для виправлення помилок, пов'язаних із великими файлами чи некоректними відповідями ШІ. У результаті створено інструмент, який дозволяє автоматизувати рутинні завдання, підвищити продуктивність і якість коду.

Налаштування та запуск модуля. Для початку роботи з розширенням його необхідно встановити в середовищі Visual Studio Code, яке доступне як через редактор, так і через Visual Studio Marketplace. Установка виконується шляхом відкриття вкладки Extensions (Ctrl+Shift+X), введення назви «Smart AI Code Assistant» у пошуку, вибору розширення від автора AI-Assistant (рис. 1), та натискання кнопки Install.

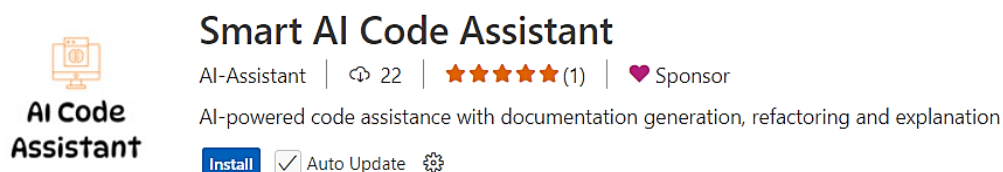


Рис. 1. Встановлення розширення у Visual Studio Code

Після завершення процесу розширення активується автоматично. Встановлення модуля можна також здійснити через Marketplace за посиланням: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=AI-Code-Assistant.smart-ai-code-assistant>. Після успішного завершення розширення з'явиться в списку встановлених. Налаштування параметрів доступне через меню Settings (Ctrl+),). Основні опції:

- aiCodeAssistant.defaultModel – вибір ШІ-моделі за замовчуванням (наприклад, grok-2-latest);
- aiCodeAssistant.enableAutoSolidAnalysis – увімкнення/вимкнення автоматичного аналізу S.O.L.I.D. (за замовчуванням вимкнено);
- aiCodeAssistant.debugMode – активація режиму налагодження (за замовчуванням вимкнено).

Для коректної роботи потрібна версія Visual Studio Code 1.97.0 або новіша. Залежності, такі як tree-sitter, openai та anthropic-ai/sdk, встановлюються автоматично, забезпечуючи повну функціональність. Детальний опис можливостей, команд та налаштувань доступний у вкладці Details у VS Code або Marketplace, що дозволяє ознайомитися з інструментом до встановлення.

Приклади використання. Генерування документації продемонстровано на прикладі Python-функції calculate_order_total без початкової документації. Користувач виділяє код і активує відповідну функцію (рис. 2).

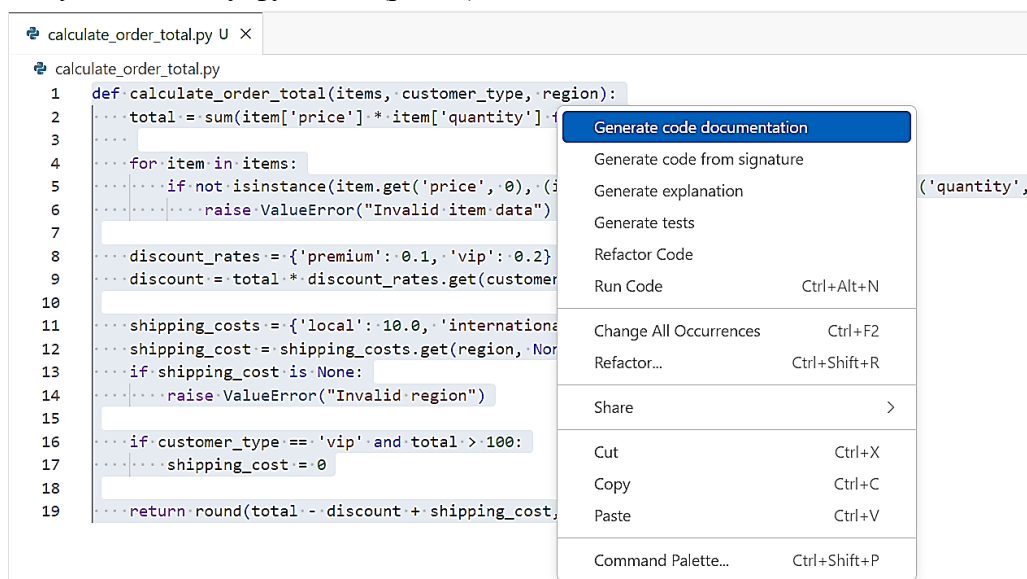


Рис. 2. Виділення коду та вибір функції генерування документації

Результат відображається у вебперегляді: зліва – оригінальний код, справа – код із доданою docstring-документацією (рис. 3).

Після затвердження оновлений код автоматично інтегрується у файл, гарантуючи незмінність коду користувача, завдяки розумній вставці документації, описаній вище. У підсумку отримано docstring-коментарі, що описують методи, їхні параметри та повернені значення, полегшуючи розуміння логіки для інших розробників.

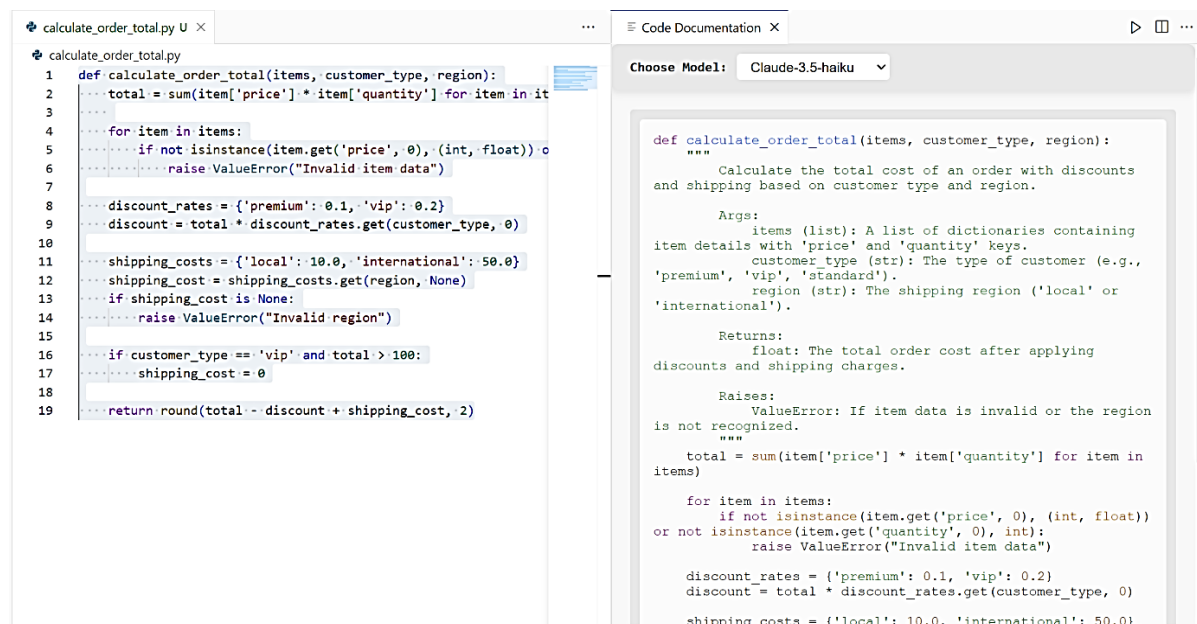


Рис. 3. Результат генерування документації

Автоматизацію рефакторингу продемонстровано на прикладі JavaScript-коду з проблемами читабельності, де функція в одному блоці обробляє список користувачів, фільтрацію, ролі, статус підписки та логування, ускладнюючи розуміння та модифікацію. Користувач виділяє код і активує функцію рефакторингу (рис. 4).

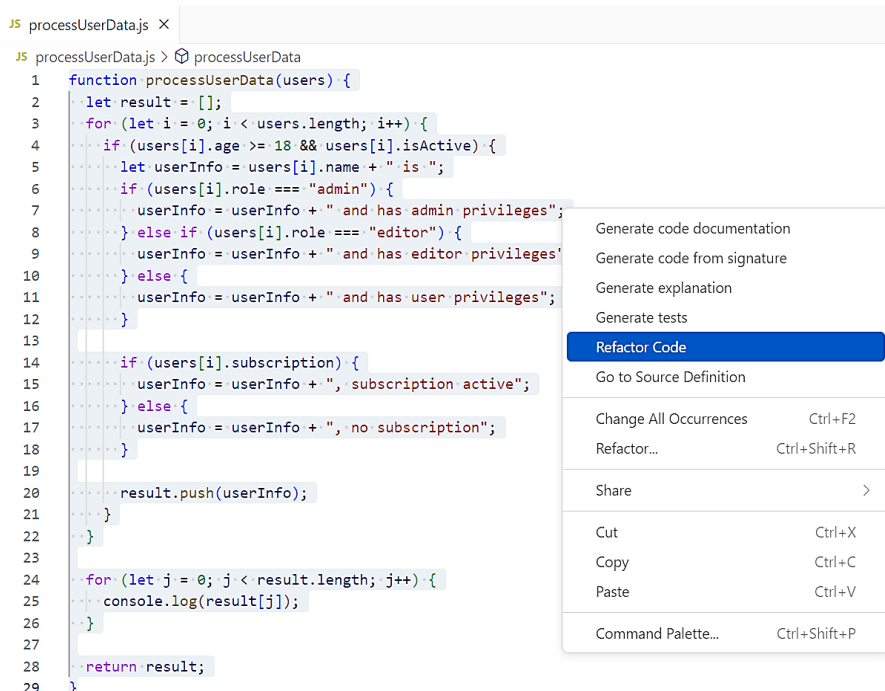


Рис. 4. Виділення коду та вибір функції рефакторингу

У вебперегляді результат показує: зліва – оригінальний код, справа – відрефакторена версія з покращеною структурою, використанням методів `filter`, `map`, `forEach` і логічним поділом (рис. 5). Після затвердження змін оновлений код замінює початковий, стаючи більш модульним, читабельним і стійким до помилок.

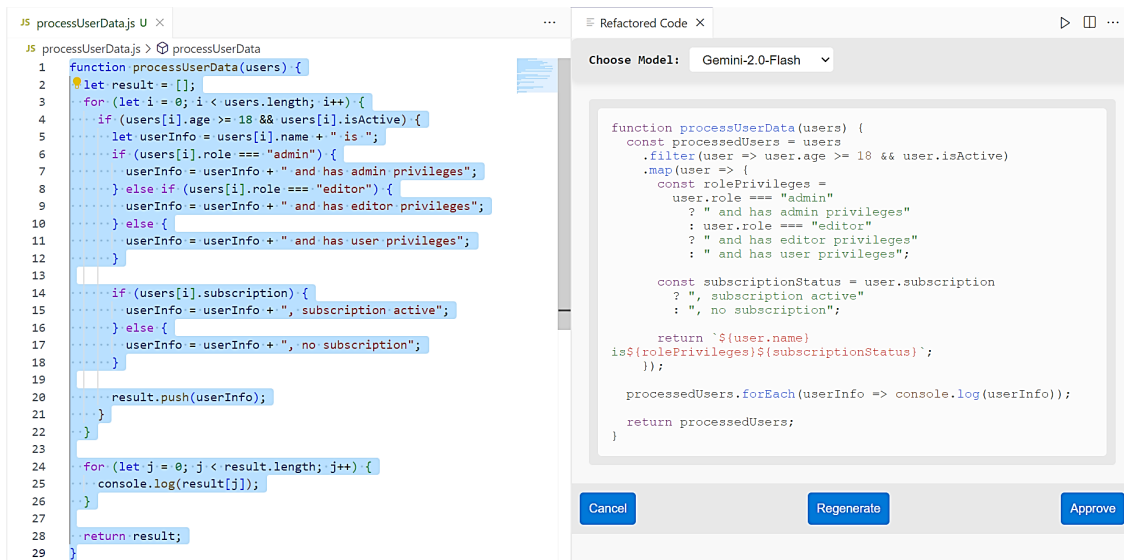


Рис. 5. Відрефакторений код, згенерований розширенням

Функціонал перевірки коду на відповідність принципам S.O.L.I.D. продемонстровано на прикладі Java-коду, що порушує принцип єдиної відповідальності (SRP). При відкритті файлу автоматично запускається аналіз, про що сповіщає повідомлення «S.O.L.I.D.-аналіз активовано» у нижній панелі редактора (рис. 6).



Рисунок 6 – Повідомлення про активацію S.O.L.I.D.-аналізу

Після завершення аналізу розширення виділяє назву класу з виявленим порушенням. При наведенні курсора з'являється спливаюче повідомлення з описом проблеми та короткою рекомендацією щодо її виправлення (рис. 7).

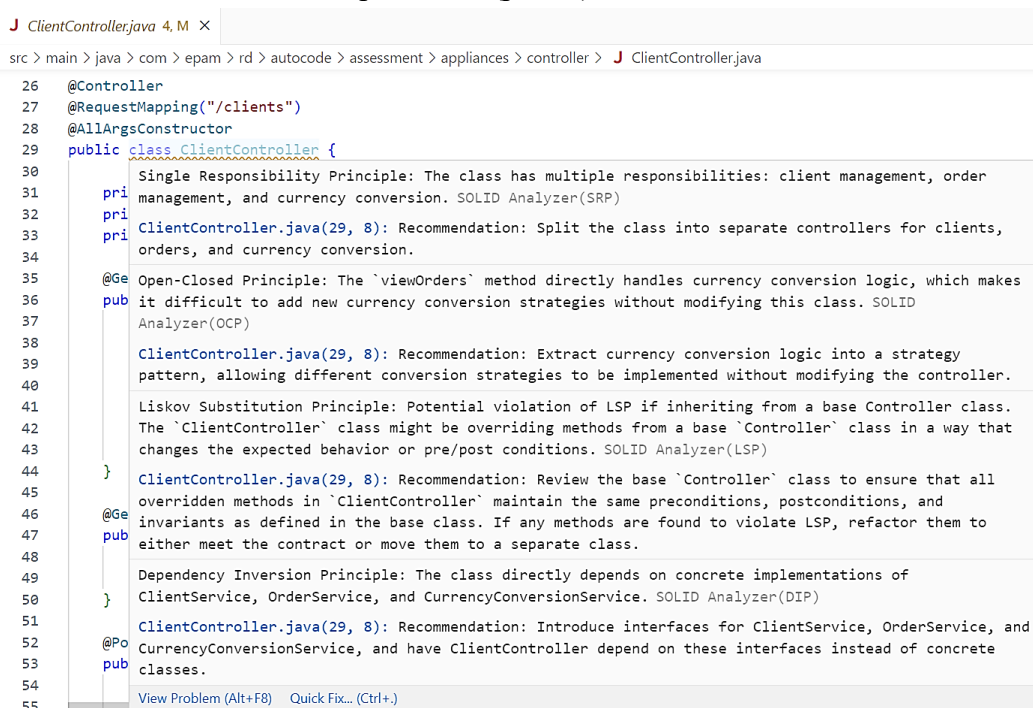


Рис. 7. Підкреслення класу з порушенням та рекомендації при наведенні

Користувач може обрати опцію Quick Fix, що відкриває панель із командами: отримати детальні рекомендації або згенерувати виправлений код для відповідності принципам (рис. 8).

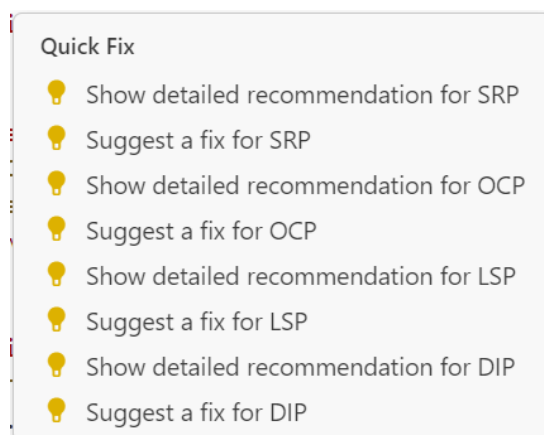


Рис. 8. Панель із командами після вибору Quick Fix

Вибір опції детальних рекомендацій відкриває веб-перегляд із покроковою інструкцією, як усунути порушення для відповідності S.O.L.I.D. (рис. 9). Якщо ж обрати команду генерування виправленого коду, розширення представить оновлену версію, де порушення усунуто шляхом розподілу логіки між окремими класами відповідно до SRP.

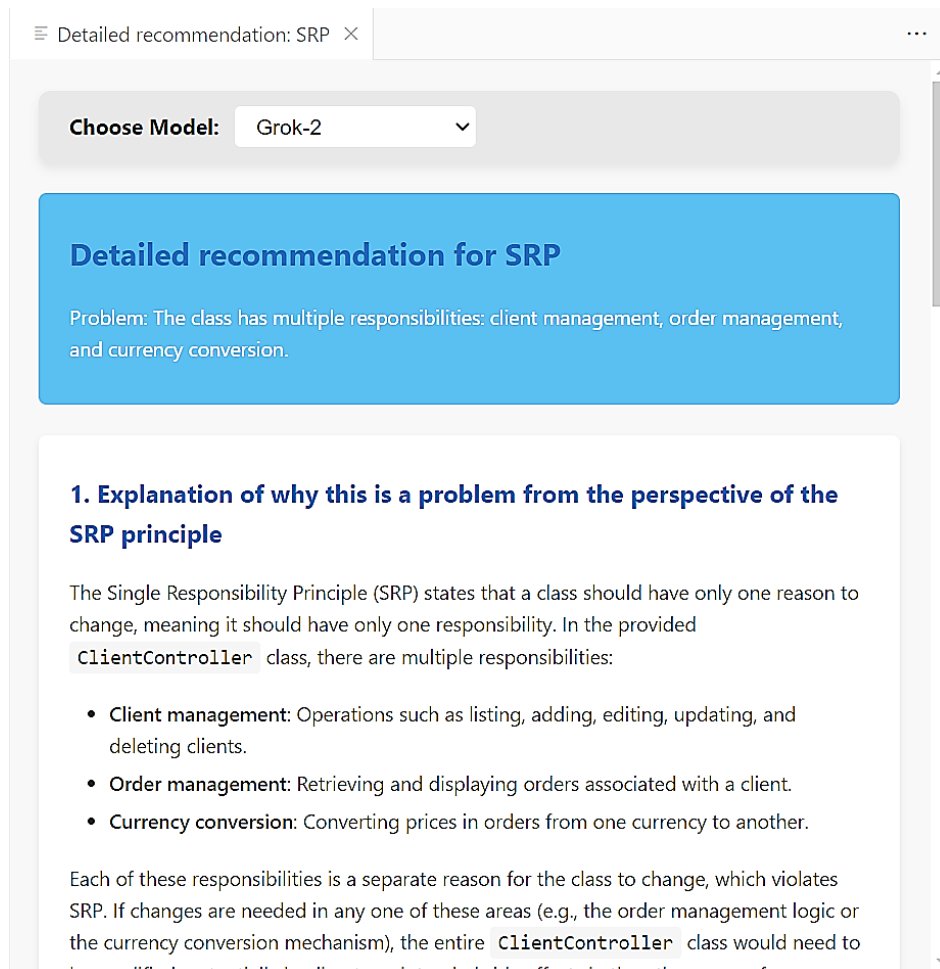


Рис. 9. Покрокові рекомендації щодо покращення коду

Дослідження ефективності ШІ-моделей у задачі автоматизації рефакторингу коду. Для оцінки ефективності було проведено дослідження на основі аналізу якості результатів на модульних тестах. Методика полягала у створенні тестів для вхідного коду, що підлягає рефакторингу, з подальшою перевіркою їх проходження після рефакторингу кожною з моделей. Такий підхід дозволив оцінити рівень виникнення помилок та час, необхідний моделі для виконання завдання. Для досягнення статистично достовірних результатів експеримент проводився на 100 спробах для кожної з моделей.

Прикладом для демонстрації рефакторингу обрано клас *TaskManager*, реалізований мовою JavaScript, який відповідає за управління списком задач. Клас має низку типових проблем, що ускладнюють підтримку: неінформативні скорочення змінних (напр. *dl*, *sr*, *n*, *d*), відсутність розподілу відповідальностей через централізовану архітектуру, неефективні ручні цикли замість методів *filter* чи *find*, а також дублювання логіки у фільтрації та пошуку. Ці недоліки роблять *TaskManager* показовим прикладом для демонстрації покращень через рефакторинг.

Експериментальна установка працює так: оригінальний код із файлу *TaskManager.js*, який містить типові проблеми, передається кожній ШІ-моделі з чітким запитом на рефакторинг. У запиті зазначається заборона змінювати назви методів, аби зберегти сумісність із наявними тестами. Досліджувалися такі моделі: *gpt-4-turbo*, *gpt-3.5-turbo*, *gpt-4o*, *grok-3-latest*, *grok-2-latest*, *deepseek-chat*, *claude-3-7-sonnet-20250219*, *claude-3-5-haiku-20241022*, *gemini-2.5-pro-exp-03-25*, *gemini-1.5-pro-latest* і *gemini-2.0-flash*. Відрефакторений код зберігається у файл *TaskManager.js*, після чого автоматично запускаються тести. Фіксуються кількість успішних і провалених тестів, а також час відповіді моделі. Результати 100 запусків для кожної моделі наведено на рис. 10.

Model	Success Rate	Avg Response Time	Passed	Failed	Total
deepseek-chat	100.00%	33.14s	3200	0	3200
claude-3-7-sonnet-20250219	100.00%	10.81s	3200	0	3200
grok-3-latest	99.93%	16.55s	2974	2	2976
claude-3-5-haiku-20241022	99.81%	14.26s	3194	6	3200
gpt-4o	99.66%	7.67s	3189	11	3200
gpt-3.5-turbo	99.16%	7.64s	3173	27	3200
grok-2-latest	99.13%	8.48s	3172	28	3200
gemini-2.0-flash	97.75%	4.24s	3128	72	3200
gemini-1.5-pro-latest	94.87%	9.75s	1184	64	1248
gpt-4-turbo	71.53%	21.44s	2289	911	3200
gemini-2.5-pro-exp-03-25	69.27%	30.33s	133	59	192

Рис. 10. Результати вимірювання ефективності ШІ-моделей у задачі автоматизації рефакторингу коду

Як показано на рис. 10-11, найкращі результати продемонстрували моделі *deepseek-chat* та *claude-3-7-sonnet-20250219*, які досягли 100 % проходження тестів без помилок. Це демонструє їх здатність рефакторити код без втрати функціональності краще, ніж інші моделі. Водночас *claude-3-7-sonnet* перевершує *deepseek-chat* за швидкістю: 10.81 секунди проти 33,14, що робить її більш зручною для інтерактивних сценаріїв.

Високу стабільність продемонстрували *grok-3-latest* (99,93%), *claude-3-5-haiku* (99,81 %) та *gpt-4o* (99,66%) із хорошим балансом між точністю та швидкістю (7,67–19,88 с). *gpt-3.5-turbo* (99,16%) і *grok-2-latest* (99,13 %) також показали високі результати при ще швидшій роботі (7,64–8,48 с). Як видно з рис. 11, *gemini-2.0-flash* (97,75 %, 4,24 с) вирізняється швидкістю, але меншою стабільністю. Найгірші результати мали *gpt-4-turbo* (71,53 %) і *gemini-2.5-pro-exp* (69,27 %), остання виконала лише 192 з 3200 тестів через проблеми з компіляцією згенерованого коду в інших 3008 випадках. Це свідчить про недостатню стабільність дослідженої версії моделі у забезпеченні синтаксичної коректності для даної задачі. *Gemini-1.5-pro* показала середню якість (94,87 %) і мала кількість запусків, нижчу відносно інших (1248) з аналогічної причини.

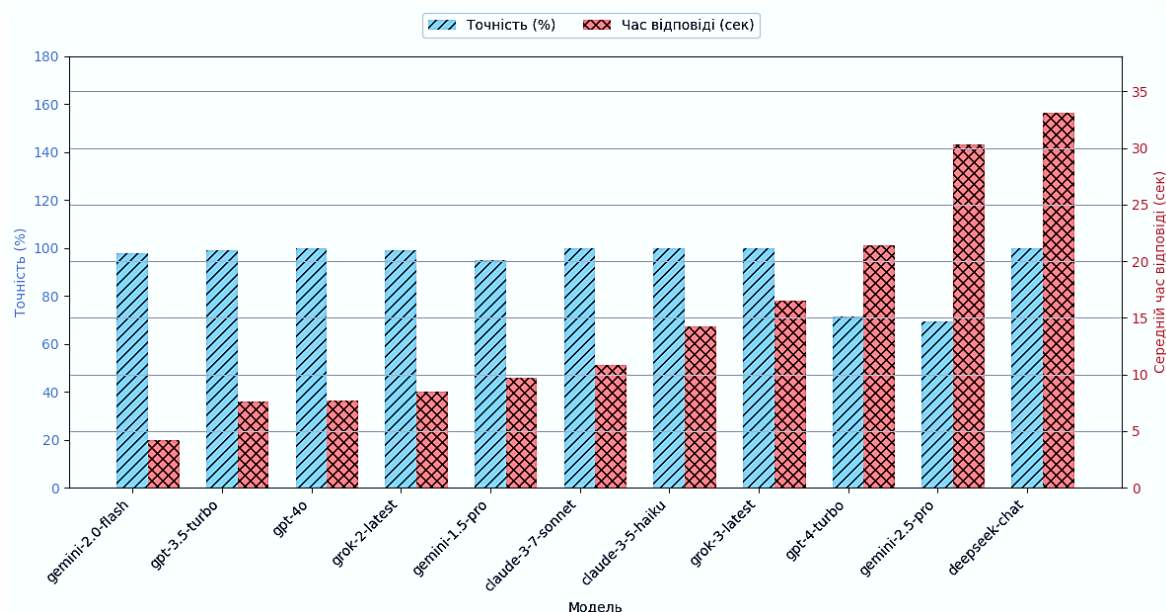


Рис. 11. Результати експерименту, відсортовані за середнім часом відповіді ШІ-моделей

Для інтегральної оцінки ШІ-моделей було введено метрику Score, яка враховує як точність рефакторингу (successRate), так і середній час відповіді (avgTime). Формула:

$$Score = \frac{k_1 \times successRate}{100} + \frac{k_2}{avgTime},$$

де *successRate* – це відсоток успішного проходження тестів;

avgTime – середній час відповіді моделі в секундах;

k_1 , k_2 – коефіцієнти, що визначають вагу точності та швидкодії, у нашому випадку обрано 70 і 30 відповідно.

Відповідно до отриманих результатів, найвищий Score отримала gemini-2.0-flash (75,51 бала) завдяки відносно швидкій роботі (4,24 с) при високій точності (97,75 %) (рис. 12). Високу ефективність також продемонстрували gpt-4o (73,67) та gpt-3.5-turbo (73,34), обидві поєднують високу стабільність зі швидкою відповіддю. Якщо ж головним критерієм є саме якість рефакторингу, найкращий вибір – claude-3-7-sonnet або deepseek-chat, які показали 100% успішності, хоч і працюють повільніше.

Model	Success Rate	Avg Response Time	Score
gemini-2.0-flash	97.75%	4.24s	75.51
gpt-4o	99.66%	7.67s	73.67
gpt-3.5-turbo	99.16%	7.64s	73.34
grok-2-latest	99.13%	8.48s	72.93
claude-3-7-sonnet-20250219	100.00%	10.81s	72.77
claude-3-5-haiku-20241022	99.81%	14.26s	71.97
grok-3-latest	99.93%	16.55s	71.77
deepseek-chat	100.00%	33.14s	70.91
gemini-1.5-pro-latest	94.87%	9.75s	69.49
gpt-4-turbo	71.53%	21.44s	51.47
gemini-2.5-pro-exp-03-25	69.27%	30.33s	49.48

Рис. 12. Порівняльна інтегральна оцінка ефективності ШІ-моделей за результатами експерименту

Результати випробувань (рис. 10-12) демонструють різну ефективність ШІ-моделей у задачі рефакторингу коду, якщо оцінювати точність і швидкість обробки. Для більш повної оцінки розглянутих моделей [8-12] варто відзначити додаткові характеристики, зокрема, розмір контекстного вікна, максимальну кількість вхідних і вихідних токенів, вартість використання API (табл. 1), що може вплинути на вибір моделей розробниками з урахуванням їхніх потреб та можливостей.

Можемо побачити, що моделі Gemini 2.5 Pro та Gemini 2.0 Flash вирізняються найбільшим контекстним вікном – 1М токенів, що робить їх оптимальними для обробки великих обсягів коду чи документації. Claude 3.7 Sonnet і Claude 3.5 Haiku (200K) та GPT-4 Turbo/GPT-4o (128K) також підтримують значні обсяги контексту, але поступаються за вихідними токенами моделям Grok 3, Grok 2 та Gemini 2.5 Pro. З економічного погляду, Gemini 2.0 Flash, який коштує 0,10-0,40 \$ за 1М токенів та DeepSeek R1, який коштує 0,27-1,10 \$, є найвигіднішими, тоді як GPT-4 Turbo має найвищу вартість: \$10.00-\$30.00.

Враховуючи якісні та вартісні показники, можна відзначити модель gemini-2.0-flash як один із можливих оптимальних виборів.

Таблиця 1 – Характеристики та вартість використання AI-моделей за API

Модель	Контекстне вікно	Вхідні токени (макс.)	Вихідні токени (макс.)	Ціна вхід (\$/1М токенів), \$	Ціна вихід (\$/1М токенів), \$
GPT-4 Turbo	128K	128 000	4 096	10.00	30.00
GPT-4o	128K	128 000	16 384	2.5	10
Grok 3	131K	65 536	65 536	3.00	15.00
Grok 2	131K	65 536	65 536	2.00	10.00
DeepSeek R1	64K	56 000	8 192	0.27	1.10
Claude 3.7 Sonnet	200K	200 000	8 192	3.00	15.00
Claude 3.5 Haiku	200K	200 000	8 192	0.80	4.00
Gemini 2.5 Pro	1M	1 048 576	65 536	1.25	10.00
Gemini 2.0 Flash	1M	1 048 576	8 192	0.10	0.40

Висновки. Розроблено новий модуль розширення Smart AI Code Assistant для Visual Studio Code, що забезпечує часткову автоматизацію процесів розробки ПЗ. Він реалізує функції автоматичного генерування документації до коду, його рефакторингу, створення модульних тестів, генерування коду за сигнатурою методу, пояснення логіки у вигляді коментарів, а також перевірки відповідності коду принципам S.O.L.I.D. з можливістю автоматичного виправлення. Особливістю і новизною є можливість обирати модель ШІ в процесі розробки. Використання ШІ-моделей, таких як ChatGPT, Grok, Claude, DeepSeek і Gemini, у поєднанні з модульною архітектурою забезпечило гнучкість і масштабованість рішення. Тестування на реальних прикладах, таких як функція `calculate_order_total` для документування чи JavaScript-код для рефакторингу, підтвердило ефективність розширення щодо підвищення продуктивності розробників і покращенні якості коду. Автоматичне злиття тестів і безпечна вставка документації через аналіз структури коду демонструють надійність підходу. Розроблене розширення готове до практичного використання.

До **перспективних напрямів подальшої розробки** можна віднести додавання підтримки нових мов програмування, таких як C#, C++, Go і TypeScript, інтеграція з платформами CI/CD, зокрема Jenkins, GitHub Actions або GitLab CI, для автоматизації перевірки S.O.L.I.D., генерування тестів і документації під час комітів чи pull-request-ів, додавання автоматичного code review в рамках pull-request-ів. Передбачається інтеграція з інструментами аналізу якості коду, такими як SonarQube, ESLint і Checkstyle, для комбінування ШІ-аналізу з традиційними статичними методами.

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

Під час написання цього матеріалу автори не використовували інструменти генеративного штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. Peng S., Kalliamvakou E., Cihon P., Demirer M. The Impact of AI on Developer Productivity: Evidence from GitHub Copilot, *arXiv:2302.06590*, 13 лют. 2023.
2. Making sense of the AI developer tools ecosystem. (n.d.). *Scott Logic*. <https://blog.scottlogic.com/2025/04/01/making-sense-of-the-ai-developer-tools-ecosystem.html>.
3. Upadhyaya, N. (n.d.). *The role of artificial intelligence in software development: A literature review*. https://www.researchgate.net/profile/Nitesh-Upadhyaya-2/publication/385781688_The_Role_of_Artificial_Intelligence_in_Software_Development_A_Literature_Review/links/67350a6869c07a4114468292/The-Role-of-Artificial-Intelligence-in-Software-Development-A-Literature-Review.pdf.
4. Alenezi, M., & Akour, M. (2025). AI-Driven innovations in software engineering: A review of current practices and future directions. *Applied Sciences*, 15(3), 1344. <https://doi.org/10.3390/app15031344>.
5. Kokol, P. (2024). The use of AI in software engineering: A synthetic knowledge synthesis of the recent research literature. *Information*, 15(6), 354. <https://doi.org/10.3390/info15060354>.
6. Sarfraz, Rawish & Riaz, Tehreem. (2024). Applications of AI in Classical Software Engineering. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42467-020-00005-4>.
7. Shankar, S. P., & Chaudhari, S. S. (2023). Framework for the automation of SDLC phases using artificial intelligence and machine learning techniques. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(6s), 379–390. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i6s.6944>.
8. OpenAI. (n.d.). *OpenAI API models*. OpenAI – official website. <https://platform.openai.com/docs/models>.
9. Models and Pricing. xAI Documentation – official website. <https://docs.x.ai/docs/models?cluster=us-east-1>.
10. Models & Pricing. DeepSeek API Docs – official website. https://api-docs.deepseek.com/quick_start/pricing/.
11. Models & pricing. Anthropic – official website. <https://docs.anthropic.com/en/docs/about-claude/models/all-models>.
12. Gemini Developer API Pricing. Google AI for Developers – official website. <https://ai.google.dev/gemini-api/docs/pricing>.

References

1. Peng S., Kalliamvakou E., Cihon P., Demirer M. The Impact of AI on Developer Productivity: Evidence from GitHub Copilot, *arXiv:2302.06590*, 13 лют. 2023.
2. Making sense of the AI developer tools ecosystem. (n.d.). *Scott Logic*. <https://blog.scottlogic.com/2025/04/01/making-sense-of-the-ai-developer-tools-ecosystem.html>.
3. Upadhyaya, N. (n.d.). *The role of artificial intelligence in software development: A literature review*. https://www.researchgate.net/profile/Nitesh-Upadhyaya-2/publication/385781688_The_Role_of_Artificial_Intelligence_in_Software_Development_A_Literature_Review/links/67350a6869c07a4114468292/The-Role-of-Artificial-Intelligence-in-Software-Development-A-Literature-Review.pdf.
4. Alenezi, M., & Akour, M. (2025). AI-Driven innovations in software engineering: A review of current practices and future directions. *Applied Sciences*, 15(3), 1344. <https://doi.org/10.3390/app15031344>.
5. Kokol, P. (2024). The use of AI in software engineering: A synthetic knowledge synthesis of the recent research literature. *Information*, 15(6), 354. <https://doi.org/10.3390/info15060354>.
6. Sarfraz, Rawish & Riaz, Tehreem. (2024). Applications of AI in Classical Software Engineering. <https://link.springer.com/article/10.1186/s42467-020-00005-4>.
7. Shankar, S. P., & Chaudhari, S. S. (2023). Framework for the automation of SDLC phases using artificial intelligence and machine learning techniques. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 11(6s), 379–390. <https://doi.org/10.17762/ijritcc.v11i6s.6944>.

8. OpenAI. (n.d.). *OpenAI API models*. OpenAI – official website. <https://platform.openai.com/docs/models>.
9. Models and Pricing. xAI Documentation – official website. <https://docs.x.ai/docs/models?cluster=us-east-1>.
10. Models & Pricing. DeepSeek API Docs – official website. https://api-docs.deepseek.com/quick_start/pricing/.
11. Models & pricing. Anthropic – official website. <https://docs.anthropic.com/en/docs/about-claude/models/all-models>.
12. Gemini Developer API Pricing. Google AI for Developers – official website. <https://ai.google.dev/gemini-api/docs/pricing>.

Отримано 19.06.2025

UDC 004.41

Oleksii Kondus¹, Oleksii Tkachenko²¹master

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: oleksii.kondus@knu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-2514-6196>. **ResearcherID:** [NLN-6147-2025](https://orcid.org/0009-0003-2514-6196)² PhD in Computer Sciences, Associate Professor, Department of Theory and Technology of Programming

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: otkachenko@knu.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9514-516X>. **ResearcherID:** [U-3613-2017](https://orcid.org/0000-0002-9514-516X)

INTELLECTUALIZED SUPPORT MODULE OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT

The fast-paced information technology market demands rapid and high-quality software development to stay competitive. However, routine tasks such as code documentation, refactoring, test creation, and ensuring S.O.L.I.D. principle compliance consume a significant amount of developer time, with studies showing that up to 50% of effort is spent on such activities. Existing tools, such as GitHub Copilot and Tabnine, offer partial automation but lack comprehensive S.O.L.I.D. analysis, flexible AI model selection, and seamless integration within environments like Visual Studio Code. This highlights the need for a robust solution to streamline workflows, aligning with the growing use of AI assistants to boost coding efficiency and quality.

This study tackles these challenges by introducing the Smart AI Code Assistant, a VS Code extension that automates routine tasks using AI models such as GPT, Claude, Gemini, Grok, and DeepSeek. The research aims to enhance developer productivity through automated documentation, refactoring, unit test generation, and S.O.L.I.D. compliance checks within a unified interface. Unlike other tools, the module allows task-specific AI model selection for optimal speed, accuracy, and cost, and provides detailed S.O.L.I.D. analysis with actionable feedback, improving code architecture.

The methodology involved analyzing automation trends, evaluating AI model capabilities, and developing S.O.L.I.D. verification methods. Built with JavaScript and Node.js, the module uses Tree-sitter for code analysis and supports languages like JavaScript, Java, and Python. Key features include safe documentation generation, modular refactoring, test integration, and S.O.L.I.D. violation reports with fixes. Experiments tested refactoring performance on a flawed JavaScript TaskManager class across 100 trials, assessing test pass rates and response times.

The results of the experiments demonstrated varying effectiveness of AI models. Claude-3-7-sonnet and deepseek-chat achieved 100% test pass rates, with Claude faster (10.81 vs. 33.14 seconds). Gemini-2.0-flash balanced speed (4.24 seconds) and accuracy (97.75%), offering cost-effectiveness. The module's cohesive VS Code integration reduces manual effort and enhances code quality. It is a practical tool with potential for expansion to languages like C# and Go, and CI/CD integration. The Smart AI Code Assistant advances software development by addressing existing tool limitations, enabling faster, higher-quality outputs.

Keywords: automation of software development; artificial intelligence; S.O.L.I.D.; refactoring; code documentation; AI models; Visual Studio Code.

Fig.: 12. Table: 1. References: 12.