

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

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



# ***ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ***

***НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ***

***№ 4(42)***



Чернігів 2025

Друкуються за рішенням вченої ради Національного університету «Чернігівська політехніка» (протокол № 13 від 22.12.2025 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. – № 4(42). – 628 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

Болотов Г. П., доктор технічних наук, професор, НУ «Чернігівська політехніка»;

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;

Новомлинцев О. О., доктор технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Охріменко О. А., доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського;

Повстаной 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»;

Пристапа 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»;

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».

Будівництво та геодезія

Білик С. І., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Корзаченко М. М., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка».

Крычок С. Д., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Михайловський Д. В., доктор технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Палайніца Б. Б., кандидат технічних наук, доцент, НУ «Львівська політехніка»;

Савенко В. І., кандидат технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури;

Терещук О.І. кандидат технічних наук, доцент, НУ «Чернігівська політехніка»;

Шульц Р. В., доктор технічних наук, професор, Університет нафти та мінералів імені короля Фаха, Міждисциплінарний науково-дослідний центр авіаційних та космічних досліджень, керівник лабораторії дистанційного зондування та аналізу, Саудівська Аравія.

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***

***№ 4(42)***



Chernihiv 2025

UDC 62:67.05  
DOI: 10.25140/2411-5363-2025-4(42)

Published by the decision of the Academic Council of the Chernihiv Polytechnic National University (protocol № 13 dated 22.12.2025). Scientific journal "Technical sciences and technologies" is included into the list of scientific specialized editions of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine dated July 11, 2019 № 975 (as amended from February 9, 2021 № 157), according to which magazine is assigned a category «B».

**Technical sciences and technologies** : scientific journal / Chernihiv Polytechnic National University. – Chernihiv : Chernihiv Polytechnic National University, 2025. – № 4(42). – 628 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

Bolotov H.P., Doctor of Technical Sciences, Professor; Chernihiv Polytechnic National 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;

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;

Tsitsiura 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;

Dudarev I.M., Doctor of Technical Sciences, 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.

Construction and geodesy

Bilyk S.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Korzachenko M. M., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Kriachok S.D., PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chernihiv Polytechnic National University;

Mykhailovskyi D.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

Palianysia B.B., PhD in Technical Sciences, PhD in Technical Sciences, Lviv Polytechnic National University;

Savenko V.I., PhD in Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Construction and Architecture;

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.

© Chernihiv Polytechnic National University, 2025





## ЗМІСТ

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО  
ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

|                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Кальченко В. В., Венжега В. І., Пасов Г. В., Кологойда А. В., Кузьмелний Я. В.</b> Шляхи підвищення енергоефективності автомобільних транспортних засобів .....                                       | 11  |
| <b>Регей І. І., Михайлів Ю. Ю.</b> Розроблення інноваційного штанцювального преса з ексцентриковим приводом натискної плити секційної будови. ....                                                       | 20  |
| <b>Адаменко Ю. І., Майданюк С. В., Плівак О. А., Лапковський С. В., Фролов В. К.</b> Метрологічна експертиза та нормоконтроль конструкторської документації в умовах малих та середніх підприємств. .... | 29  |
| <b>Балицька Н. О.</b> Фазові перетворення у сплавах NI-Ti при лезовій обробці. ....                                                                                                                      | 43  |
| <b>Гречка А. І., Пузирьов О. Л.</b> Інноваційні підходи до підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей. ....                                                                             | 55  |
| <b>Олексієнко С. В., Ющенко С. М., Руденко М. М.</b> Конструювання скло-кремнієвих вузлів датчиків тиску та вплив їх розмірних параметрів на опір руйнуванню. ....                                       | 63  |
| <b>Петрушинець Л. В., Фальченко Ю. В., Костін В. А., Федорчук В. Є., Пузрін О. Л.</b> Вплив циклу зварювання на вміст фазових виділень в сплаві МА2-1. ....                                              | 75  |
| <b>Kolesnyk V., Berezniak O.</b> Thermomechanical and tribological aspects of cutting multilayer CFRP–titanium alloy stacks. ....                                                                        | 82  |
| <b>Козирєв О. С., Казляк О. Д., Романенко М. В., Дубнюк В. Л., Ключников Ю. В.</b> Моделювання процесів лазерного нагрівання металів на основі аналізу теплових полів. ....                              | 99  |
| <b>Нагорна І. В.</b> Особливості викладання інженерної та комп'ютерної графіки в умовах воєнного стану. ....                                                                                             | 122 |
| <b>Nusratzade M.</b> UH-60 energy analysis for S <sub>0</sub> and S <sub>2</sub> configurations. ....                                                                                                    | 127 |
| <b>Sabol M., Kovaluk D., Semjon J., Takac K., Biezenko O.</b> Verification of geometric characteristics of the robot using a laser interferometer. ....                                                  | 134 |
| <b>Петренко І. О., Ганєєв Т. Р., Болотов М. Г., Стеценко М. М.</b> Дослідження структурно-якісних змін поліетилентерефталатгліколі з включеннями переробленого поліетилентерефталатгліколю. ....         | 142 |

## РОЗДІЛ ІІ. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Солодка Н. О., Троцило О. В.</b> Використання жадібних та генетичних алгоритмів для оптимального розміщення станцій мобільних мереж. ....                                        | 156 |
| <b>Байда В. Д., Велигорський О. А.</b> Ідентифікація паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму генетичним алгоритмом. ....                                       | 165 |
| <b>Воробійов І. О., Великодний Д. В.</b> Оптимізація архітектури системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання на основі контейнеризації та хмарних сервісів. ....  | 187 |
| <b>Гайдай А. Р., Клименко І. А.</b> Високопродуктивна апаратно-програмна система для граничної обробки сенсорних потоків у системах IoT на платформі FPGA-SoC. ....                 | 195 |
| <b>Зінченко П. В., Мехед Д. Б.</b> Інформаційна технологія автоматичної оптимізації мультирегіональної інфраструктури. ....                                                         | 208 |
| <b>Макренко Р. О., Шовкопляс О. А.</b> Практична реалізація моделі оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці з використанням методу «швидкого дерева». .... | 218 |
| <b>Максимов О. В., Лисенко Д. Е.</b> Порівняльний аналіз методів використання природномовної обробки для автоматизованого генерування тест-кейсів. ....                             | 233 |
| <b>Пархоменко Б. М., Міщенко М. В.</b> Застосування мовних моделей великого масштабу для аналізу заголовків та формування розширених ознак у прогнозуванні фінансових ринків. ....  | 245 |
| <b>Півненко С. В., Прокопенко Т. О.</b> Формування критеріїв оцінювання якості освіти в закладах фахової передвищої освіти. ....                                                    | 253 |
| <b>Штанько В. І., Нікітенко Є. В.</b> Визначення ефективності дворівневого класифікатора мережевих потоків. ....                                                                    | 266 |

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Бялий М. О., Пампуха І. В.</b> Аналіз підходів щодо пошуку оптимальної структури геоінформаційної системи військового призначення. ....       | 277 |
| <b>Соколов О. І., Соколов О. О., Жураковська О. С.</b> Алгоритм розподілу допоміжних виробничих витрат для фінансових інформаційних систем. .... | 286 |

### РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Бровін О. Ю., Коваленко Ю. І., Лещенко С. А., Дерібо С. Г., Чорна Н. А.</b> Вплив складу активного шару оксидного кобальт-титанового анода на кінетику реакції виділення хлору. ....                 | 294 |
| <b>Буяльська Н. П., Денисова Н. М.</b> Зниження глікемічності бісквітних виробів за рахунок використання екобезпечних цукрозамінників рослинного походження. ....                                       | 303 |
| <b>Жданюк Н. В.</b> Дослідження міцності натрій-кальцій-силікатного скла, зміцненого іонообмінним методом. ....                                                                                         | 314 |
| <b>Пономарьова Л. М., Довгополов А. Ю., Лупирь В. В., Лазаренко А. А., Козлов Б. В.</b> Розробка безпечних піротехнічних димових композицій: хімічний аспект та токсикологічна оцінка. ....             | 325 |
| <b>Філінська Т. Г., Приходько К. В., Філінська А. О., Черваков О. В.</b> Дослідження впливу кількості жолудевого борошна на показники якості кексів. ....                                               | 333 |
| <b>Лозовий О. О., Плаван В. П., Титаренко С. С., Охмат О. А., Зайцев Є. Ю., Крюкова О. А.</b> Вибір поверхнево-активних речовин для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену. .... | 344 |

### РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

|                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Приступа А. Л., Ятченко Є. М., Ревко А. С., Кулько Т. В.</b> Контроль параметрів системи електрозабезпечення мультикоптерних дронів. ....                                                                                                 | 354 |
| <b>Захарченко Д. С., Сила Я. М., Степенко С. А.</b> Забезпечення електроживлення для будівель з нульовим енергоспоживанням на основі автономних систем з відновлювальними джерелами та накопичувачами електроенергії. ....                   | 365 |
| <b>Якушкін Т. В., Єршов Р. Д.</b> Огляд двонаправлених перетворювачів постійної напруги з широкими діапазонами вхідних та вихідних напруг для автономних систем генерації електричної енергії на основі фотоелектричних перетворювачів. .... | 382 |
| <b>Стрункін Г. М., Шамрай А. Є.</b> Моделювання вимикання надшвидкодійного бездугового вимикача постійного струму. ....                                                                                                                      | 412 |
| <b>Єрмолов С. В., Денисов Д. Ю.</b> Метод моделювання електроенергетичних процесів систем квадрокоптера. ....                                                                                                                                | 420 |
| <b>Данилів С. П., Гусєв П. С.</b> Порівняльний аналіз ефективності повітряних та геотермальних теплових насосів встановлених в Україні. ....                                                                                                 | 430 |
| <b>Parkhomets V., Shevchenko-Hryshko M., Revko A., Gorodniy O.</b> Artificial intelligence models for quality control of toroid transformer windings. ....                                                                                   | 444 |

### РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Зацерковний В. І., Ворох В. В., Івшин В. Г., Деркач О. Л.</b> Використання ДЗЗ та ГІС в експертній грошовій оцінці земель сільськогосподарського призначення на прикладі Чернігівської області. .... | 457 |
| <b>Іванишин В. А., Корзаченко М. М., Чорний Є. І.</b> Результати інженерно-геологічних досліджень під будівництво транспортно-логістичного центру на вул. Кільцевій м. Чернігова. ....                  | 475 |
| <b>Колесников А. В., Левицький Д. В.</b> Дослідження і оптимізація складів реставраційних композитів для будівель з вапняку-черепашнику. ....                                                           | 485 |
| <b>Савченко О. В., Ганєєва Т. В.</b> QGIS як інструмент просторового аналізу в сучасному містобудуванні. ....                                                                                           | 501 |
| <b>Сербов М. Г., Толмачова А. В., Пилип'юк В. В.</b> Оптимізація екологічних параметрів меліоративних систем для збереження біорізноманіття агроландшафтів. ....                                        | 509 |

|                                                                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Бридун А. М., Чоботаєва М. В., Согор А. Р., Ярема Н. П.</b> Застосування ГІС для комплексного аналізу екологічного стану річки Південний Буг у межах Хмельницької та Вінницької областей. ....      | 522 |
| <b>Копинець З. П., Матюшенко І. М., Маєвський В. О., Удовицький О. М., Ференц О. Б.</b> Перспективи використання відходів від переробки деревинної сировини у виробництві будівельних композитів. .... | 532 |
| <b>Наливайко Т. А., Наливайко Т. Т., Маслій Л. О.</b> Удосконалення геодезичних методів при визначенні геометричних параметрів Гончарівського мосту через р. Лопань в м. Харків. ....                  | 542 |
| <b>Радзінська Ю. Б., Нестеренко С., Афанасьєв О.</b> Lean-geodesy як сучасна концепція організації геодезичного виробництва: теоретичні засади та практичні аспекти впровадження. ....                 | 551 |
| <b>Радюв С. Г., Ротте С. В., Волонтир А. В., Іванова Л. В., Кузнецова О. В.</b> Вставка перехідних кривих під час реконструкції доріг. ....                                                            | 562 |
| <b>Тартачинська З. Р., Пилипак Р. О.</b> Точність визначення напрямку на північ для різних типів компасів. ....                                                                                        | 572 |
| <b>Удовенко І. О., Смоленська Л. І., Молнар Д. С. С.</b> Модернізація електронної геодезичної мережі для потреб кадастру територіальних громад: технологічні бар'єри та суспільні імперативи. ....     | 581 |
| <b>Щербак Ю. В., Корнієнко І. В., Сахно Є. Ю., Заворотний С. М.</b> Функціонування державного земельного кадастру в Україні: адаптація до умов воєнного стану та перспективи. ....                     | 592 |
| <b>Беспалько Н. Р.</b> Францисканський кадастр на Буковині: історія та актуальність використання. ....                                                                                                 | 603 |
| <b>Захарченко Д. Б., Малік Т. М.</b> Аналіз підходів щодо підвищення якості зображень. ....                                                                                                            | 616 |
| <b>ОСНОВНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАЧІ РУКОПИСІВ СТАТЕЙ</b> .....                                                                                                                                   | 627 |

## CONTENT

### SECTION I. APPLIED MECHANICS, MATERIALS SCIENCE AND MACHINE BUILDING

|                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Kalchenko V., Venzhega V., Pasov H., Kolohoida A., Kuzhelnyi Ya.</b> Improving energy efficiency of motor vehicles.....                                                                                    | 11  |
| <b>Rehei I., Mykhayliv Yu.</b> Development of an innovative die-cutting press with an eccentric drive of a sectional pressure plate.....                                                                      | 20  |
| <b>Adamenko Yu., Maidaniuk S., Plivak O., Lapkovsky S., Frolov V.</b> Metrological expertise and norm control of engineering documents in small and medium-sized enterprises .....                            | 29  |
| <b>Balytska N.</b> Phase transformations in NITI alloys during cutting processes .....                                                                                                                        | 43  |
| <b>Hrechka A., Puzyrov O.</b> Innovative approaches to improving the efficiency of mechanical processes.....                                                                                                  | 55  |
| <b>Oleksiienko S., Yushchenko S., Rudenko M.</b> Designing of glass-silicon nodes of pressure sensors and influence of their dimensional parameters on fracture resistance.....                               | 63  |
| <b>Petrushynets L., Falchenko Iu., Kostin V., Fedorchuk V., Puzrin O.</b> The influence of the welding cycle on the content of phase precipitations in the MA2-1 alloy .....                                  | 75  |
| <b>Kolesnyk V., Berezniak O.</b> Thermomechanical and tribological aspects of cutting multilayer CFRP–titanium alloy stacks. ....                                                                             | 82  |
| <b>Kozyriev O., Kaglyak O., Romanenko M., Dubnyuk V., Klychnykov Yu.</b> Modeling of laser heating processes in metals based on thermal field analysis.....                                                   | 99  |
| <b>Nahorna I.</b> Features of teaching engineering and computer graphics in martial law .....                                                                                                                 | 122 |
| <b>Nusratzade M.</b> UH-60 energy analysis for $S_0$ and $S_2$ configurations. ....                                                                                                                           | 127 |
| <b>Sabol M., Kovaluk D., Semjon J., Takac K., Biezhenko O.</b> Verification of geometric characteristics of the robot using a laser interferometer. ....                                                      | 134 |
| <b>Petrenko I., Hanieiev T., Bolotov M., Stetsenko M.</b> Study of structural and qualitative changes in polyethylene terephthalate glycol with inclusions of recycled polyethylene terephthalate glycol..... | 142 |

### SECTION II. INFORMATION AND COMPUTER TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Solodka N., Troshchylo O.</b> Use of greedy and genetic algorithms for optimal mobile network base station placement.....                                                   | 156 |
| <b>Baida V., Velihorskyi O.</b> Identification of parasitic parameters of a DC converter model using a genetic algorithm .....                                                 | 165 |
| <b>Vorobyov I., Velykodnyi D.</b> Optimization of the architecture of a remote access system to telecommunication equipment based on containerization and cloud services ..... | 187 |
| <b>Haidai A., Klymenko I.</b> High-performance hardware-software system for EDGE processing of sensor data streams in IoT systems on an FPGA-SoC platform .....                | 195 |
| <b>Zinchenko P., Mekhed D.</b> Information technology for dynamic optimization of multi-region cloud deployments.....                                                          | 208 |
| <b>Makrenko R., Shovkoplyas O.</b> Practical implementation of the model for assessing the functional effectiveness of remote workers using the “fast tree” method .....       | 218 |
| <b>Maksymov O., Lysenko D.</b> Comparative analysis of natural language processing methods for automated test case generation .....                                            | 233 |
| <b>Parkhomenko B., Mishchenko M.</b> Application of large-scale language models for headline analysis and formation of advanced characters in financial risks forecasting..... | 245 |
| <b>Pivnenko S., Prokopenko T.</b> Formation of criteria for assessing the quality of education in vocational institutions of higher education.....                             | 253 |
| <b>Shtanko V., Nikitenko Ye.</b> Evaluating the effectiveness of a two-level network flow classifier.....                                                                      | 266 |
| <b>Bialyi M., Pampukha I.</b> Analysis of approaches to finding the optimal structure of a military-oriented geographic information system .....                               | 277 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Sokolov O., Sokolov O., Zhurakovska O.</b> Algorithm for allocating auxiliary production costs for finance information systems ..... | 286 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### SECTION III. CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Brovin O., Kovalenko Yu., Leshchenko S., Deribo S., Chorna N.</b> Influence of active layer composition of cobalt-titanium oxide anode on kinetics of chlorine evolution reaction .....   | 294 |
| <b>Buialska N., Denisova N.</b> Reducing the glycemic rate of sponge cake products through the use of ecologically safe sugar substitutes of plant origin .....                              | 303 |
| <b>Zhdaniuk N.</b> Research on the strength of sodium-calcium-silicate glass strengthened by ion-exchange method .....                                                                       | 314 |
| <b>Ponomarova L., Dovhopolov A., Lupyr V., Lazarenko A., Kozlov B.</b> Development of safe pyrotechnic smoke compositions: chemical aspect and toxicological assessment.....                 | 325 |
| <b>Filinska T., Prykhodko K., Filinska A., Chervakov O.</b> Research on the influence of acorn flour amount on cake quality indicators.....                                                  | 333 |
| <b>Lozovyi O., Plavan V., Tytarenko S., Okhmat O., Zaitsev Ye., Kryukova O.</b> Selection of surface-active agents for application in mechanical recycling technologies of polyethylene..... | 344 |

### SECTION IV. ENERGY, ELECTRICAL ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Prystupa A., Yatchenko Ye., Revko A., Kulko T.</b> Control of electrical parameters of multicopter drones.....                                                                                          | 354 |
| <b>Zakharchenko D., Sylja Ja., Stepenko S.</b> Power supply for zero-energy buildings based on autonomous systems with renewable sources and electricity storage systems.....                              | 365 |
| <b>Yakushkin T., Yershov R.</b> Review of bidirectional DC-DC converters with wide input and output voltage ranges for autonomous electric power generation systems based on photovoltaic converters ..... | 382 |
| <b>Strunkin H., Shamrai A.</b> Simulation of ultra-fast arc-less dc circuit breaker tripping .....                                                                                                         | 412 |
| <b>Yermolov S., Denisov D.</b> Ways to model the electroenergy processes of a quadcopter system .....                                                                                                      | 420 |
| <b>Danyliv S., Gusiev P.</b> Comparative analysis of the efficiency of air-source and ground-source heat pumps installed in Ukraine .....                                                                  | 430 |
| <b>Parkhomets V., Shevchenko-Hryshko M., Revko A., Gorodniy O.</b> Artificial intelligence models for quality control of toroid transformer windings. ....                                                 | 444 |

### SECTION V. CONSTRUCTION AND GEODESY

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Zatserkovny V., Vorokh V., Ivshyn V., Derkach O.</b> Use of remote sensing and GIS in expert monetary valuation of agricultural lands: a case study of Chernihiv region .....                  | 457 |
| <b>Ivanyshtyn V., Korzachenko M., Chorny Ye.</b> Results of engineering-geological investigations for the construction of a transport and logistics center on Kil'tseva street in Chernihiv ..... | 475 |
| <b>Kolesnykov A.; Levytskyi D.</b> Research and optimization of the composition of restoration composites for shell limestone buildings .....                                                     | 485 |
| <b>Savchenko O., Hanieieva T.</b> QGIS as a spatial analysis tool in modern urban planning .....                                                                                                  | 501 |
| <b>Serbov M., Tolmachova A., Pylypyuk V.</b> Optimization of environmental parameters of land reclamation systems for the preservation of biodiversity in agricultural landscapes .....           | 509 |
| <b>Brydun A., Chobotaieva M., Sohor A., Yarema N.</b> Application of GIS for the analysis of the ecological state of the Southern Bug river within the Khmelnytskyi and Vinnytsia regions.....    | 522 |
| <b>Kopynets Z., Matiushenko I., Mayevskyy V., Udovitskyi O., Ferents O.</b> Prospects for using wood processing waste in the production of construction composites.....                           | 532 |
| <b>Nalivayko T., Nalivayko T., Maslii L.</b> Improvement of geodesic methods in determining the geometric parameters of the Honchariv bridge over the Lopan river in Kharkiv.....                 | 542 |
| <b>Radzinska Yu., Nesterenko S., Afanasyev A.</b> Lean-geodesy as a modern concept of organizing geodetic production: theoretical framework and practical implementation aspects.....             | 551 |
| <b>Radov S., Rotte S., Volontyr A., Ivanova L., Kuznetsova O.</b> Insertion of transition curves during road reconstruction.....                                                                  | 562 |

|                                                                                                                                                                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b><i>Tartachynska Z., Pylypyak R.</i></b> Accuracy of determining the north direction for different types of compasses .....                                                                                              | 572        |
| <b><i>Udoenko I., Smolenska L., Molnar D. Stefan</i></b> Modernization of electronic geodetic infrastructure for the needs of the cadaster of territorial communities: technological barriers and social imperatives ..... | 581        |
| <b><i>Shcherbak Yu., Kornienko I., Sakhno E., Zavorotnyi S.</i></b> Functioning of the state land cadastre in Ukraine: adaptation to martial arts conditions and prospects.....                                            | 592        |
| <b><i>Bespalko N.</i></b> Franciscan cadastre on Bukovina: history and relevance of use.....                                                                                                                               | 603        |
| <b><i>Zakharchenko D., Malik T.</i></b> Analysis of approaches to image quality enhancement .....                                                                                                                          | 616        |
| <b>BASIC REQUIREMENTS FOR EXECUTION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS OF SCIENTIFIC ARTICLES .....</b>                                                                                                                         | <b>627</b> |



# РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-11-19](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-11-19)

УДК 621.113

**Володимир Віталійович Кальченко<sup>1</sup>, Володимир Іванович Венжега<sup>2</sup>,  
Геннадій Володимирович Пасов<sup>3</sup>, Антоніна Вікторівна Кологойда<sup>4</sup>,  
Ярослав Володимирович Кужельний<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vykalchenko74@gmail.com](mailto:vykalchenko74@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>

ResearcherID: G-6752-2014. Scopus Author ID: 56644727300

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [vivenzhega@gmail.com](mailto:vivenzhega@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>

ResearcherID: H-3560-2014. Scopus Author ID: 16510833000

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [genapasov@gmail.com](mailto:genapasov@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>

ResearcherID: H-4455-2014. Scopus Author ID: 57220212743

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [kolohoida@gmail.com](mailto:kolohoida@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>

ResearcherID: I-1118-2014. Scopus Author ID: 57222329484

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [k.y.v.immortal@gmail.com](mailto:k.y.v.immortal@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>. Researcher ID: J-1127-2016

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМОБІЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Паливна економічність автомобілів із двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) є одним із ключових показників їхніх експлуатаційних характеристик, оскільки витрати на паливо суттєво впливають на собівартість перевезень вантажів і пасажирів. Підвищення енергоефективності автотранспортних засобів (АТЗ) є важливим і актуальним завданням, яке дозволяє зменшити витрати палива, знизити викиди парникових газів, зменшити вплив на довкілля. Собівартість перевезень істотно залежить від паливної економічності автомобіля, оскільки витрати на паливо становлять приблизно 20...25 % усіх витрат на перевезення. Тому чим вище паливна економічність автомобіля, тим менше витрата палива і нижче собівартість перевезень. Для підвищення енергоефективності автомобільних транспортних засобів потрібен системний і комплексний підхід. Він повинен враховувати такі фактори, як створення удосконалених за енергоефективністю двигунів, використання сонячних панелей для додаткового живлення електроніки, альтернативних видів палива (низькомолекулярних спиртів, водню, електроенергії та інших), експлуатаційні фактори, впровадження інтелектуальних систем керування.

Стаття є публікацією оглядово-інформаційного характеру.

**Ключові слова:** автомобільні транспортні засоби (АТЗ); енергоефективність АТЗ; паливна економічність АТЗ; альтернативні джерела енергії; системи енергозбереження.

Табл.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Останніми роками спостерігається значне збільшення кількості автомобільних транспортних засобів, а отже, і споживання палива на автомобільному транспорті. Підвищення енергоефективності автотранспортних засобів (АТЗ) є важливим і актуальним завданням, яке дозволяє зменшити витрати палива, знизити викиди парникових газів, зменшити вплив на довкілля. Одним із найбільш важливих експлуатаційних показників, що впливає на собівартість перевезень, є паливна економічність автомобіля, оскільки витрати на паливо становлять в середньому 20...25% всіх ви-

трат на пасажирські й вантажні перевезення. Тому з покращенням паливної економічності автомобілів, зменшуються витрати палива і собівартість перевезень. Однак не лише скорочення прямих витрат на паливо та мастила покращує енергоефективність АТЗ. У наш час у багатьох країнах світу, в тому числі й в Україні, широко застосовують сучасні способи реалізації технологій енергоощадження при виготовленні та експлуатації транспортних засобів та інфраструктури.

**Постановка проблеми.** На найближчі десятиліття теплові поршневі двигуни, що працюють на бензині, дизельному пальному, газі, альтернативних видах палива залишаться основними типами силових установок автомобілів. Це змушує шукати нові шляхи підходу до розв'язання паливно-економічної та екологічної проблем. Такими шляхами є перехід на нові, більш ефективні види палива, наприклад, водень, вдосконалення конструкцій автомобілів, експлуатаційні фактори, застосування на автомобільному транспорті сучасних інформаційних технологій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під паливною економічністю автомобіля розуміють показники витрат палива при перевезенні пасажирів, вантажів, виконання спеціальної роботи в різних умовах експлуатації. Витрати автомобілем палива залежать від п'яти основних чинників. Це витрата палива у двигуні на подолання теплових, механічних і помпових витрат у двигуні, аеродинамічного опору, опору дороги, механічних витрат в трансмісії, сил інерції автомобіля, що характеризується рівнянням паливного балансу. Ці витрати палива при русі без прискорення по горизонтальній поверхні із середньою швидкістю руху розподіляються наступним чином: витрати палива на подолання витрат у двигуні становлять 64-68 %, на подолання опору дороги 12-15 %, аеродинамічного опору 10-15 %, витрат в трансмісії – 9-12 %.

Найбільш поширеним показником витрат палива в країнах Євросоюзу й в Україні є шляхові витрати палива, тобто витрата палива на 100 км пройденого шляху. Однак цей показник не завжди дає можливість оцінити правильно вплив корисного навантаження на паливну економічність автомобіля, тому більш точно оцінює паливну економічність витрата палива, віднесена до тонно- чи пасажиро-кілометра [1].

При рівномірному русі автомобіля паливну економічність автомобіля оцінюють за допомогою, що являє собою залежність питомої витрати  $g_e$  палива (г / кВт год), від швидкості руху автомобіля на різних передачах коробки передач і при різних дорожніх умовах, які характеризуються величиною коефіцієнта опору дороги  $\psi$  [1-3] під час стендових або дорожніх випробувань. Ця характеристика вперше була запропонована академіком Є. Чудаковим. За графіком паливно-економічної характеристики можна вирішити і зворотну задачу, тобто визначити найбільшу швидкість руху, що відповідає бажаній витраті палива. За даними досліджень паливна економічність автомобілів з гідромеханічними передачами через низький ККД гідротрансформатора, що входить до неї, нижча на 3-7 %, ніж із механічною трансмісією [4]. Витрати автомобілем палива більші в місті з інтенсивним дорожнім рухом, що пояснюється великою кількістю різких розгонів та гальмувань і менші при роботі автомобіля на позаміських маршрутах. При різкому натисканні на педаль акселератора активується прискорювальний насос, унаслідок чого паливна суміш стає занадто багатою, що призводить до неповного її згоряння та, як наслідок – до збільшення витрати пального [5]. Дослідженню і покращенню аеродинамічних характеристик автомобілів для зменшення витрат палива присвячені роботи [6-9]. Дуже важливою експлуатаційною властивістю автомобілів є їхня екологічність, що визначається негативним впливом на довкілля і проявляється у викидах шкідливих речовин, шумі та використанні ресурсів, насамперед палива. Найекологічнішими є електромобілі, а найменш екологіч-

ними – бензинові та дизельні автомобілі старіших стандартів, які характеризуються викидами в атмосферу великої кількості шкідливих речовин, таких як CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> та твердих частинок. Гібридні автомобілі є проміжним варіантом, що зменшує викиди порівняно з традиційними авто. Робота [10] присвячена аналізу показників екологічності автомобілів з бензиновими та дизельними двигунами та наданню рекомендацій щодо їх покращення.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що для підвищення енергоефективності автомобільних транспортних засобів потрібен системний і комплексний підхід. Він повинен враховувати не тільки традиційні, але й такі фактори, як створення сучасних вдосконалених за енергоефективністю двигунів, використання сонячних панелей для додаткового живлення електроніки, використання альтернативних видів палива (низькомолекулярних спиртів, водню, електроенергії та інших), експлуатаційні фактори, впровадження інтелектуальних систем керування.

**Метою статті** є аналіз підходів і формулювання рекомендацій для вирішення проблеми підвищення енергоефективності автомобільних транспортних засобів за рахунок комплексного впровадження сучасних способів реалізації технологій енергозбереження при виготовленні та експлуатації транспортних засобів.

**Виклад основного матеріалу.** Проведемо аналіз основних методів підвищення енергоефективності АТЗ.

#### 1. Поліпшення аеродинамічних характеристик.

Сила опору повітря істотно впливає на тягово-швидкісні властивості автомобіля і паливну економічність, особливо при високих швидкостях руху автомобіля або за наявності вітру. Аеродинамічний опір автомобіля розділяють на п'ять складових:

- опір форми (лобовий) близько – 60-75 %;
- опір виступів і западин близько – 5-17 %;
- опір внутрішніх потоків близько – 5-7 %;
- індуктивний опір, який зумовлений підйомом кузова автомобіля при великих швидкостях;
- поверхневий опір.

Основною складовою аеродинамічного опору є лобовий опір. Він викликаний зоною підвищеного тиску повітря спереду автомобіля при його русі та зоною розрідження позаду. За рахунок різниці тиску і створюється сила лобового опору. При цьому він буде тим більший, чим більше вихороутворення як попереду, так і позаду автомобіля. Щодо величини вихороутворення, то вона залежить, перш за все, від форми тіл, що рухаються.

Найістотніший вплив на опір руху чинить передня частина. Так, якщо створити заокруглювання в передній і задній частині фігури, що має плоскі стінки, то опір можна зменшити на 72 %. Оптимальною з погляду зниження опору повітря формою тіла є форма падаючої краплі з невеликим перетином, розташованим на відстані однієї третини довжини тіла від його переднього краю. Причому довжина тіла повинна перевищувати його найбільший діаметр приблизно в шість разів. Однак така форма для реального автомобіля неприйнятна, тому що не забезпечує необхідних функціональних властивостей. Одночасно різними компонувальними, конструктивними і технологічними рішеннями намагаються наблизитися до оптимальної конструкції форми кузова автомобіля.

Сила лобового опору  $P_{пл}$  визначається за формулою:

$$P_{пл} = C_x \rho \frac{v^2}{2} F_{\text{п}}, \quad (1)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт аеродинамічного (лобового) опору (обтічності);

$\rho$  – щільність повітря (за температури 15 °С і барометричного тиску 0,1 МПа приймають  $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ );

$F_n$  – площа лобового опору (миделевого перерізу), а саме площа проєкції автомобіля на площину, перпендикулярну до його поздовжньої осі визначається за формулою:

$$F_n = \alpha HB, \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт заповнення площі: для легкових автомобілів – 0,7...0,8; для вантажних – 0,75...0,9; для автобусів – 0,85...0,9.

$H, B$  – найбільша габаритна висота і ширина автомобіля.

Оскільки в довідковій літературі відсутні значення коефіцієнта  $C_x$ , добуток коефіцієнта  $0,5 \cdot C_x \cdot \rho$  приводять до коефіцієнта обтічності  $K_n$  (коефіцієнт опору повітря), що еквівалентний силі опору повітря, яка діє на 1 м<sup>2</sup> площі автомобіля за відносної швидкості 1 м/с і має розмірність Н·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>.

При русі автомобіля в нерухомому повітряному середовищі силу опору повітря можна подати за формулою

$$P_n = K_n F_n V^2. \quad (3)$$

Добуток  $K_n \cdot F_n$  називають фактором обтічності.

Наближені значення  $C_x, K_n, F$  і  $K_n \cdot F$  наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри обтічності автомобілів

| Автомобілі          |                        | $C_x$    | $K_n, \text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ | $F, \text{м}^2$ | $K_n \cdot F, \text{Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ |
|---------------------|------------------------|----------|---------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------|
| Легкові             |                        | 0,27-0,6 | 0,2-0,35                                    | 1,6-2,8         | 0,3-1,0                                             |
| Автобуси            | капотного компонування | 0,75-0,9 | 0,45-0,55                                   |                 |                                                     |
|                     | вагонного компонування | 0,6-0,75 | 0,35-0,45                                   | 4,5-6,5         | 1,1-2,6                                             |
| Вантажні автомобілі | бортові                | 0,9-1,15 | 0,5-0,7                                     | 3,0-5,0         | 1,8-3,5                                             |
|                     | з кузовом фургон       | 0,8-1,0  | 0,5-0,6                                     |                 |                                                     |
| Автоцистерни        |                        | 0,9-1,1  | 0,55-0,65                                   |                 |                                                     |
| Автопоїзди          |                        | 1,4-1,55 | 0,85-0,95                                   |                 |                                                     |
| Перегонові          |                        | 0,25-0,3 | 0,15-0,2                                    |                 |                                                     |

Параметр  $V$ , що входить в рівняння сили опору повітря, може бути визначений як

$$V = V_1 \pm V_v,$$

де  $V_1$  – швидкість руху автомобіля;

$V_v$  – швидкість вітру (+ зустрічний вітер; - ходовий вітер).

Сила опору повітря направлена протилежно до вектора швидкості руху автомобіля, її розглядають у вигляді зосередженої сили, прикладеної в точці, яку назвали центром парусності автомобіля. Відстань від опорної поверхні до центра парусності називається висотою центра парусності  $h_n$ . Вона зазвичай не збігається з центром мас автомобіля. Таким чином, покращення аеродинамічних характеристик може бути досягнуто такими шляхами:

- зменшення опору повітря через оптимізацію форми кузова;
- використанням аеродинамічних компонентів, таких як спойлери або обтічники;
- використанням легких матеріалів для зниження ваги і покращення динамічних властивостей.

## 2. Зменшення витрат палива за рахунок конструктивних чинників.

Заміна карбюраторного двигуна на дизель зменшує витрати палива вантажних автомобілів на 40 %, і легкових на 30 %. Таке зменшення зумовлено меншою питомою витратою палива дизельним двигуном (210...240 г/кВт·год) порівняно з карбюраторним (310...340 г/кВт·год) а також меншими витратами при зменшенні ступеня використання потужності.

До конструктивних факторів, що впливають на характер згоряння палива в карбюраторних двигунах, належать: ступінь стиску, форму камери згоряння, розташування і кількість свіч запалювання, розміри гільз циліндрів, матеріал поршнів, голівок блоку і гільз циліндрів і деякі інші. Так, збільшення ступеня стиску з 6,7 до 8,5 дозволяє підвищити ефективну потужність двигуна з 155 до 190 к. с., а питому витрату палива зменшити з 240 до 225 г/кВт·год. Однак це можливо тільки в деяких межах, що обмежуються техніко-економічними розуміннями (збільшення вартості двигуна, підвищення вимоги до палива, посилення небезпеки самозапалювання палива й ін.).

Застосування наддування також служить одним з ефективних способів підвищення потужності та економічності двигуна, однак через різке зростання тиску й температури робочої суміші, як і при підвищенні ступеня стиску, потрібно паливо з більш високою детонаційною стійкістю.

Зменшенню ймовірності детонаційного згоряння сприяє зниження температури робочої суміші в результаті поліпшення охолодження, що обумовлюється багатьма конструктивними факторами (наприклад, удосконаленням форми камери згоряння, виготовленням голівки блоку і деталей циліндро-поршневої групи з металів великої теплопровідності тощо).

На характер згоряння робочої суміші впливають і інші конструктивні фактори (наприклад, діаметр поршня, місце розташування свічок запалювання і т. ін.). Зокрема, збільшення діаметра циліндра подовжує шлях проходження фронту полум'я, у результаті чого зростає час згоряння робочої суміші, а в незгорілій її частині різко (за рахунок стискання) підвищується тиск. Це і сприяє виникненню детонаційного згоряння. Оцінюючи загалом вплив конструктивних факторів на процес згоряння палива, можна зробити висновок, що двигун буде тим досконаліше, чим менш він вимогливий при тому ж самому ступені стиску до детонаційної стійкості бензину.

Значний економічний ефект дає також гібридизація – поєднання двигунів внутрішнього згоряння та електродвигунів та перехід на електричні або водневі силові установки.

### 3. Покращення характеристик трансмісій.

Останнім часом намітилась тенденція випереджаючого розвитку конструкцій трансмісій автомобілів в порівнянні з двигунами внутрішнього згорання. Усе більше в трансмісіях, незважаючи на підвищення собівартості, застосовують гальма накопичувачі енергії, системи стоп-старт, стабілізації руху, автоматичного керування рухом, найбільш ефективного використання джерела енергії та перерозподілу крутного моменту з метою покращення прохідності, безпеки руху тощо. У зв'язку з застосуванням гібридних автомобілів у трансмісіях використовуються однопотоківі або двопотоківі схеми передачі крутного моменту. Дедалі більше у трансмісіях застосовуються роботизовані системи. Автоматизація керування здійснюється шляхом удосконалення існуючих конструкцій. Так, керування фрикційним зчепленням, шляхом застосування роботизованих систем, становиться автоматичним. Шляхом встановлення подвійного зчеплення та двопотокової схеми передачі крутного моменту в коробці передач, не переривається силовий потік, при перемиканні передач. Частіше знаходять застосування варіатори або автоматичні коробки передач з оптимізованим програмним забезпеченням.

### 4. Зменшення ваги.

Чим більше важить автомобіль, тим більше енергії потрібно, щоб переміщати його в просторі. Це означає, що необхідно більше палива, а збільшення згоряння бензину/дизеля ще збільшує і кількість шкідливих викидів. Дослідження виробників транспортних засобів показують, що зниження ваги легкових та вантажних автомобілів можна досягти за рахунок використання легких сплавів, карбонових та композитних матеріалів та оптимізації конструкції шасі та кузова.

### 5. Ефективні шини.

Сила опору коченню  $P_f$  викликана гістерезисними втратами в шині (тертям у гумово-кордній оболонці, гумі протектора і в контакті колеса з дорогою) при її радіальній, тангенціальній і бічній деформаціях і ковзаннях у зоні контакту. Опір коченню залежить від таких основних чинників: типу і стану опорної поверхні; типу шини та її конструкції; швидкості руху; тиску повітря в шині; крутного моменту, що діє на шину; температури шини; ступеня зносу протектора тощо. Оскільки неможливо врахувати умови роботи кожного колеса окремо, то використовується усереднене значення коефіцієнтів опору коченню кожного колеса автомобіля, а сумарний опір коченню автомобіля визначається за формулою:

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_{fi} = f G_a \cos \alpha \quad (4)$$

де  $G_a$  - вага автомобіля в Н;

$\alpha$  - кут нахилу опорної поверхні в град.;

$f$  - коефіцієнт опору коченню.

Використання шин з низьким опором кочення та оптимальним тиском у шинах, знижує витрати палива та підвищує їх довговічність.

#### 6. Використання альтернативних джерел енергії.

Енергоощадження на транспорті безпосередньо пов'язане з видом палива, що використовується. Це позначається на собівартості перевезень і екологічній складовій. Так, додаткові переваги дає використання зрідженого газу. Знижуються викиди окису вуглецю, та інших вуглеводнів. Точка кипіння пропану менша, ніж дизеля та бензину, що дозволяє забезпечити повне згоряння палива без використання засобів випарювання та змішування з повітрям. Значний ефект дає використання альтернативних видів палива таких як біопаливо, спирти, водень, сонячних панелей для додаткового живлення електроніки, електроенергії, як палива для автомобілів.

#### 7. Експлуатаційні фактори.

Серед експлуатаційних факторів, що впливають на процес згоряння робочої суміші, варто виділити кут випередження запалювання, частоту обертання колінчастого вала двигуна, коефіцієнт надлишку повітря, тепловий режим і навантаження двигуна, утворення нагару на поверхнях камери згоряння та інші.

Найвигідніший, строго визначений кут випередження запалювання робочої суміші встановлюють для одержання максимальної потужності двигуна.

Частота обертання колінчастого вала двигуна також впливає на процес згоряння. З її збільшенням швидше поширюється фронт полум'я і разом з тим скорочується час, що відводиться на згоряння палива. Отже, збільшення частоти обертання колінчастого вала являє собою фактор, сприятливий запобіганню детонації.

Від коефіцієнта надлишку повітря, що характеризує склад суміші, істотною мірою залежить швидкість згоряння, палива. Найбільш небезпечні у відношенні детонації умови створюються при коефіцієнті  $\alpha = 0,9 \dots 1,1$ , якому відповідає максимальна швидкість протікання передполумєневих процесів окиснювання в робочій суміші. Вихід за межі цих значень  $\alpha$  зменшує ймовірність появи детонації. При збідненні пальної суміші зростає витрата тепла на підігрів зайвого повітря, а отже, знижується температура суміші. При збагаченні суміші зменшується концентрація кисню, відповідно і інтенсивність утворення перекисів, які сприяють детонації.

Покращення охолодження деталей двигуна й особливо інтенсивне відведення тепла від стінок камери згоряння з метою зниження температури робочої суміші при згорянні є важливими факторами запобігання детонаційному згорянню.

Нагаровідкладення на поверхнях камери згоряння сильно погіршують відвід тепла від робочої суміші й водночас збільшують степінь стиску. Доведено, що теплопровідність нагару приблизно в 50 разів менше, ніж теплопровідність чавуну або сталі. Тепловий стан двигуна погіршується і в результаті утворення в системі охолодження (особливо на поверхнях голівки циліндрів) накипу, що також має дуже низьку теплопровідність.

Тому необхідно періодично проводити перевірку двигуна, трансмісії, системи запалювання, охолодження, своєчасну заміну мастила і фільтрів. Реалізація цих заходів допомагає значно покращити енергоефективність АТЗ, зменшуючи як витрати палива, так і вплив на довкілля.

8. Системи енергоощадження.

З них найбільш поширені системи рекуперації енергії гальмування та енергоощадні системи освітлення (світлодіоди).

9. Інтелектуальні системи керування.

З інтелектуальних систем керування застосовуються автоматичні системи економії енергії, такі як “старт-стоп” та оптимізація маршрутів за допомогою GPS для зменшення витрат палива.

10. Професійність водія та стиль його водіння.

Для забезпечення ефективного використання пального під час їзди необхідно дотримуватися таких рекомендацій:

- під час руху слід використовувати вищі передачі в коробці передач, що дозволить збільшити завантаження двигуна і, відповідно, підвищити його ефективність, зменшуючи витрату пального;
- швидкість руху автомобіля на асфальтобетонному покритті не повинна перевищувати  $0,75 V_{\max}$ , оскільки в цьому випадку суттєво зростає потужність опору повітря, яка залежить від куба швидкості;
- рух автомобіля необхідно здійснювати без різких розгонів та гальмувань, оскільки при різкому натисканні на педаль акселератора активується прискорювальний насос, унаслідок чого паливна суміш стає занадто багатою, що призводить до неповного згоряння суміші та, як наслідок, до збільшення витрати пального;
- рух автомобілів слід здійснювати при обертах двигуна  $n_e < (0,6 \dots 0,7) n_{\max}$ , оскільки при таких обертах двигуна питомі витрати пального є мінімальними, бо паливо згорає найбільш ефективно;
- розробка програм екологічного водіння (eco-driving), які знижують витрати палива.

**Висновки.** У роботі проведено дослідження та систематизацію основних факторів, що впливають на енергоефективність АТЗ. На основі проведеного аналізу пропонується наряду із застосуванням традиційних методів енергозатратності автомобілів використання більш сучасних, таких як вдосконалених за енергоефективністю двигунів, сонячних панелей для додаткового живлення електроніки, альтернативних видів палива (низькомолекулярних спиртів, водню, електроенергії та інших), впровадження інтелектуальних систем керування тощо. У комплексі ці заходи дадуть значний економічний ефект при здійсненні вантажних та пасажирських перевезень.

### Список використаних джерел

1. Волков, В. П., & Вільський, Г. Б. (2010). *Теорія руху автомобіля: Підручник*. Університетська книга.
2. Волков, В. П. (2003). *Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів напрямку «Інженерна механіка»*. ХНАДУ.
3. Солтус, А. П. (2006). *Теорія експлуатаційних властивостей автомобіля*. Арістей.
4. Кошарний, М. Ф. (1992). *Основи механіки та енергетики автомобіля*. Вища школа.
5. Абрамчук, Ф. І., Гутаревич, Ю. Ф., Долганов, К. Є., & Тимченко, І. І. (2004). *Автомобільні двигуни* (2-ге вид.). Арістей.
6. Katz, J. (2015). *New directions in race aerodynamics: Designing for speed*.
7. Ehsani, M. (2018). *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*. CRC Press.
8. Rill, G., & Arrieta Castro, A. (2020). *Road vehicle dynamics*. CRC Press.
9. Дослідження аеродинамічних характеристик автомобіля шляхом комп'ютерного моделювання. (2021). *Матеріали конференції*. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/1.-per-vy-roz-kumashynobud.-in-riyi...-s.-1.pdf>.
10. Викиди CO<sub>2</sub> від автомобілів: цифри та факти (інфографіка). (2022). *EU Reporter*. <https://uk.eureporter.co/environment/co2-emissions/2022/06/06/co2-emissionsfrom-cars-facts-and-figures-infographics>.

## References

1. Volkov, V. P., & Vilskyi, H. B. (2010). *Teoriia rukhu avtomobilia [Theory of Vehicle Motion]*. Universytetska knyha.
2. Volkov, V. P. (2003). *Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobilia: Navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv napriamu «Inzhenerna mekhanika». [Theory of vehicle performance characteristics: A textbook for students of higher educational institutions majoring in Engineering Mechanics]*. Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhnyimi universytet.
3. Soltus, A. P. (2006). *Teoriia ekspluatatsiinykh vlastyvostei avtomobilia [Theory of Vehicle Performance]*. Aristei.
4. Kosharnyi, M. F. (1992). *Osnovy mekhaniky ta enerhetyky avtomobilia [Theory of Vehicle Performance: A Study Guide]*. Vyshcha shkola.
5. Abramchuk, F. I., Hutarevych, Yu. F., Dolhanov, K. Ye., & Tymchenko, I. I. (2004). *Avtomobilni dvyhuny [Car engines]* (2nd ed.). Aristei.
6. Katz, J. (2015). *New directions in race aerodynamics: Designing for speed*.
7. Ehsani, M. (2018). *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*. CRC Press.
8. Rill, G., & Arrieta Castro, A. (2020). *Road vehicle dynamics*. CRC Press.
9. Doslidzhennia aerodynamichnykh kharakterystyk avtomobilia shliakhom kompiuternoho modeliuvannia [Research of aerodynamic characteristics of a car by computer modeling]. (2021). <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/05/1.-per-vy-roz-kumashynobud.-in-riyi...-s.-1.pdf>.
10. Vykydy CO<sub>2</sub> vid avtomobiliv: tsyfry ta fakty (infohrafika) [CO<sub>2</sub> emissions from cars: figures and facts (infographics)]. (2022). <https://uk.eureporter.co/environment/co2-emissions/2022/06/06/co2-emissionsfrom-cars-facts-and-figures-infographics>.

Дата першого надходження статті до видання: 13.10.2025  
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.11.2025

UDC 621.923

**Volodymyr Kalchenko<sup>1</sup>, Volodymyr Venzhega<sup>2</sup>, Hennadiy Pasov<sup>3</sup>,  
 Antonina Kolohoida<sup>4</sup>, Yaroslav Kuzhelnyi<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector in scientific and pedagogical work  
 Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [vykalchenko74@gmail.com](mailto:vykalchenko74@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-9072-2976>  
**ResearcherID:** G-6752-2014. **Scopus Author ID:** 56644727300

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building  
 Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [vivenzhega@gmail.com](mailto:vivenzhega@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-8857-349X>  
**ResearcherID:** H-3560-2014. **Scopus Author ID:** 16510833000

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Industrial Mechanical Engineering  
 Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [genapasov@gmail.com](mailto:genapasov@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>  
**ResearcherID:** H-4455-2014. **Scopus Author ID:** 57220212743

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building  
 Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [kolohoida@gmail.com](mailto:kolohoida@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1742-2686>  
**ResearcherID:** I-1118-2014. **Scopus Author ID:** 57222329484

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Automobile Transport and Sectoral Machine Building, Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** [k.y.v.immortal@gmail.com](mailto:k.y.v.immortal@gmail.com). **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-5269-8557>. **Researcher ID:** J-1127-2016

## IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF MOTOR VEHICLES

*Fuel efficiency of vehicles with internal combustion engines (ICE) is one of the key indicators of their operational characteristics, since fuel costs significantly affect the cost of transporting goods and passengers. Increasing the energy efficiency of motor vehicles (MVs) is an important and urgent task that allows you to reduce fuel consumption, reduce greenhouse gas emissions, and reduce the impact on the environment. The cost of transportation depends significantly on the fuel efficiency of the vehicle, since fuel costs account for approximately 20...25 % of all transportation costs. Therefore, the higher the fuel efficiency of the vehicle, the lower the fuel consumption and the lower the cost of transportation. The fuel efficiency of a vehicle is determined by such indicators as hourly fuel consumption (mass of fuel consumed in one hour) and specific fuel consumption*



(mass of fuel consumed in one hour per unit of engine power). The main indicator of fuel efficiency in most countries of the world is fuel consumption in liters per 100 km. of the route traveled. To assess the efficiency of transport work, the fuel consumption indicator per unit of transport work (the ratio of actual fuel consumption to the transport work performed) is used. However, energy saving in transport is manifested not only in a direct reduction in fuel and lubricant costs. There are also other, modern ways to implement energy-saving technologies in the manufacture and operation of vehicles. To increase the energy efficiency of motor vehicles, a systematic and comprehensive approach is needed. It should take into account the factors as follows: the creation of engines with improved energy efficiency, the use of solar panels for additional power supply of electronics, alternative fuels (low-molecular alcohols, hydrogen, electricity, and others), operational factors, and the introduction of intelligent control systems. The national standards of Ukraine establish these indicators of fuel efficiency of a car as control fuel consumption (CFC), fuel consumption in the highway driving cycle (HFC), fuel consumption in the city driving cycle (HCC), fuel characteristic of sustainable traffic (FC), fuel-speed characteristic on a highway-hilly road (FC).

The article is a publication of a review and informational nature.

**Keywords:** motor vehicles (MV); energy efficiency of MVs; fuel economy of MVs; alternative energy sources; energy saving systems.

Table: 1. References: 10.

**Іван Іванович Регей<sup>1</sup>, Юрій Юрійович Михайлів<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: [Ivan.I.Rehei@lpnu.ua](mailto:Ivan.I.Rehei@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>

Scopus Author ID: [57209409155](https://orcid.org/0000-0002-3395-2994)

<sup>2</sup>аспірант кафедри комп'ютеризованих комплексів поліграфічних та пакувальних виробництв  
Національний університет «Львівська політехніка» (Львів, Україна)

E-mail: [Yurii.Y.Muhailiv@lpnu.ua](mailto:Yurii.Y.Muhailiv@lpnu.ua)

## **РОЗРОБЛЕННЯ ІННОВАЦІЙНОГО ШТАНЦЮВАЛЬНОГО ПРЕСА З ЕКСЦЕНТРИКОВИМ ПРИВОДОМ НАТИСКНОЇ ПЛИТИ СЕКЦІЙНОЇ БУДОВИ**

*Констатовано, що сучасне штанцювальне обладнання набуло досконалого експлуатаційного рівня. Разом з тим, воно віднесене до категорії важконавантаженого через переборювання пресом значних технологічних опорів. Наголошено на актуальності проблеми з мінімізації піків силового навантаження штанцювальних пресів. Запропоновано варіант її вирішення заміною моноблочної конструкції натискної плити преса секційною. Розглядається використання привода секцій натискної плити з використанням ексцентрикових механізмів. Виконано їх геометричний синтез та обґрунтовано технічну реалізацію налагоджування секцій натискної плити. Аналітично отримано значення кута зміщення ексцентриків на валах сусідніх секцій натискної плити для різних товщин картонних заготовок.*

**Ключові слова:** пакування; штанцювальне обладнання; штанцювальний прес; штанцювальна форма; ексцентрикний механізм; картонна заготовка; секція натискної плити; геометричний синтез.

Рис.: 5. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасне штанцювальне обладнання набуло досконалого експлуатаційного рівня завдяки впровадженню інноваційних технічних рішень. Автоматизація та механізація усіх процесів (від подачі самонакладом картонних заготовок, транспортування їх через технологічні секції до укладання у стоси виготовлених і роз'єднаних розгортки), за умови високої продуктивності, заслужено виводить штанцювальну техніку на рівень передової. Разом з тим, штанцювальні автомати належать до категорії важконавантаженого обладнання через переборювання пресом значних технологічних опорів під час виготовлення розгортки. Як результат – актуалізується проблема їх мінімізації, що важливо для економії матеріало- та енергоресурсів при модернізації та розробленні технологічного обладнання нового покоління.

**Постановка проблеми.** У наш час більше споживачів, які віддають перевагу товарам на основі паперу та картону. Скерування пріоритету в бік сталого розвитку й підтримки брендів, які використовують відновні ресурси, змінюють попит, підштовхують усе більше компаній до впровадження рішень для пакувань на основі природних матеріалів [1]. Крім того, картонна тара характеризується значним експортним потенціалом завдяки своїм екологічним властивостям та відповідності вимогам міжнародних стандартів. Доступна вартість та висока якість продукції сприяють вітчизняним виробникам успішному конкуруванню на міжнародних ринках [2].

Для виготовлення розгортки, що є першим етапом у технологічному ланцюжку продукування картонної тари, задіюють штанцювальне обладнання. Його комплектують пресами, у яких для привода натискної плити використовують важільні розклинювальні та ексцентрикові механізми [3]. Особливість експлуатації штанцювальних пресів пов'язана з переборюванням плитою значних технологічних опорів, значення яких сягають більше декількох сотень тонн [4]. Ця обставина є ключовою, на основі якої їх класифікують як важконавантажене обладнання.

Мінімізацію значних навантажень у приводах натискної плити запропоновано реалізовувати заміною її моноблочної конструкції секційною. Результат такої заміни полягає в суттєвому зменшенні циклічних пікових навантажень привода [5]. Оскільки для виробництва розгортки використовують картон різних видів з різними фізичними властивостями,

важливе першочергове завдання підготовки пресів різної конструкції до експлуатації пов'язане з розробленням технічного обґрунтування щодо налагоджування їхніх приводів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У праці [6] ключовим підходом в аналітичних дослідженнях штанцювальних пресів окреслено інноваційне застосування теорії подібності в техніці. За «одиничний» прийнято параметр лінійного переміщення натискної плити й на цій основі, як стверджує автор, зручно виконувати розрахунки різних механізмів. Крім того, для суттєвого зменшення пікових навантажень преса запропоновано секційну побудову натискної плити. Проте автор публікації не розкриває технічних умов функціонування її секцій. Не пояснена також процедура налагоджування механізмів їхнього привода, оскільки для продукування розгортки використовують картон різної товщини.

Як стверджують автори праці [7], традиційні плоскі штанцювальні преси мають ряд суттєвих недоліків. Серед них: ергомісткість, складність налаштування, нерівномірність навантаження, що призводить до зниження якості продукції. У статті запропоновано конструкцію плоскоциліндрового штанцювального преса, експлуатація якого мінімізує недоліки використання традиційних плоских пресів. Автори стверджують, що реверсивний рух натискного циліндра дозволяє здійснювати штанцювання як під час прямого, так і зворотного ходу, що підвищує продуктивність обладнання. Варто зазначити, що в наш час практика виготовлення розгортки з картону за допомогою плоскоциліндрових пресів не впроваджена у виробництво через ряд причин. До того ж проблемною є процедура штанцювання розгортки з картону під час зворотного ходу натискного циліндра через незафіксоване заднє поле картонної заготовки.

У праці [8] автор констатує, що штанцювальні преси є важливим компонентом обладнання для виготовлення розгортки картонного пакування. Ефективність та якість їх продукування значною мірою залежать від конструкції механізмів привода натискної плити преса та умов експлуатації. У праці наведено кінематичний аналіз функціонування розклинювального механізму привода притискної плити за допомогою програмного забезпечення SolidWorks. На базі дослідження зміни значень кінематичних характеристик виконано порівняльний аналіз функціонування механізмів привода притискної плити. Попри ґрунтовний порівняльний аналіз функціонування існуючого розклинювального механізму привода натискної плити та пропонованого комбінованого з використанням зубчастого зачеплення, у статті не вирішена задача мінімізації пікових навантажень через переборювання пресом технологічних опорів.

Автори праці [9] акцентують увагу на перевагах та недоліках обладнання, яке використовується для штанцювання розгортки з картону. Серед негативних – погіршення якості розгортки через коливний рух натискної плити у плоских штанцювальних пресах із використанням розклинювальних механізмів. Окрема складова дослідження авторів праці – аналіз нових технічних розробок пресів. Проте, попри наведені особливості їх конструкцій та опис функціонування, у даній праці відсутні приклади нових пропозицій розробників, що стосуються мінімізації силового навантаження штанцювальних пресів.

У праці [10] автори стверджують, що процес штанцювання розгортки з картону короткотривалий через незначну його товщину (порівняно з ходом натискної плити), але сумарний опір, який вона переборює, суттєвий. Складові опору – деформування ежкторних подушок, висікання розгортки уздовж контуру, формування канавок згину бігуванням. Мінімізацію пікового навантаження у приводі преса автори запропонували реалізувати заміною моноблочної конструкції натискної плити секційною. Така пропонована технічна модернізація забезпечує умови для послідовного штанцювання заготовок з картону окремими секціями. Автори праці аналітично дослідили кутове зміщення кривошипів (залежно від товщини оброблюваного матеріалу) на приводному валу, які приводять у рух паралельні розклинювальні механізми. Варто зазначити, що, крім пресів,

укомплектованих розклинювальними механізмами привода натискної плити, експлуатуються преси з ексцентриковими механізмами. Тому важливими є дослідження зі створення їхньої секційної будови, технічних умов функціонування та налагоджування.

Автори праці [11] розвивають теорію подібності та стверджують, що вона дозволяє інженерам за допомогою набору інструментів, відомих як методи подібності, встановлювати необхідні умови для проєктування масштабованої (збільшеної або зменшеної) моделі повномасштабного прототипу конструкції. Важливість теорії подібності полягає в застосуванні для створення лінійки інноваційного технологічного обладнання, що різниться як форматом, так і функціональним призначенням.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз останніх публікацій засвідчив, що актуалізується проблема мінімізації технологічного навантаження у штанцювальних пресах. Її вирішення в обмеженому чи розширеному результативному форматі відкриває нові можливості для реалізації інноваційних технічних напрацювань зі створення технологічного обладнання нового покоління. Важливе місце в лінійці перспектив займає розроблення привода натискної плити секційної будови з використанням ексцентрикових механізмів.

**Мета статті** – обґрунтувати технічну конструкцію інноваційного штанцювального преса із застосуванням натискної плити секційної будови, виконати геометричний синтез ексцентрикових механізмів для індивідуального привода секцій, аналітично обґрунтувати технічне налагоджування механізмів залежно від фізичних властивостей оброблюваного матеріалу.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Запропоновано конструкцію штанцювального преса, у якому нижня натискна плита складається з трьох окремих секцій. Кожна з них приводиться в рух за допомогою валів, на яких зафіксована пара ексцентриків. Ексцентрики вмонтовані в роликові підшипники кочення і шляхом контакту їх зовнішніх кілець із накладками приводять у рух секції натискної плити. Завдяки цьому забезпечується почергове штанцювання картонної заготовки окремими секціями, що призводить до суттєвого зменшення сумарного технологічного опору від штанцювання шляхом його диференціювання на складові. За результатами кваліфікаційної експертизи УКРНОІВІ видав позитивні висновки та рішення за заявкою на винахід.

Прес штанцювального автомата укомплектований нерухомою плитою 1 (рис. 1), закріпленою до станини, з плоскою штанцювальною формою 2. Рухома натискна плита складається з окремих пустотілих секцій 3<sub>1</sub>, 3<sub>2</sub> та 3<sub>3</sub>, що щільно прилягають одна до одної у напрямку переміщення картонної заготовки КЗ та обмежені вертикальними напрямними (на рисунку не позначено). До внутрішніх верхніх горизонтальних площин секцій 3<sub>1</sub>, 3<sub>2</sub> та 3<sub>3</sub> прикріплені накладки 4<sub>1</sub>, 4<sub>2</sub> та 4<sub>3</sub>, з якими контактують зовнішні кільця пари роликових підшипників 5<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub>; 6<sub>1</sub>, 6<sub>2</sub>; 7<sub>1</sub>, 7<sub>2</sub>. У підшипники 5<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub> вмонтовані ексцентрики 8<sub>1</sub>, 8<sub>2</sub>, у 6<sub>1</sub>, 6<sub>2</sub> – 9<sub>1</sub>, 9<sub>2</sub> та у підшипники 7<sub>1</sub>, 7<sub>2</sub> – ексцентрики 10<sub>1</sub>, 10<sub>2</sub>. Ексцентрики посаджені та зафіксовані на паралельних валах 11<sub>1</sub> та 11<sub>2</sub>, на яких (за межами секції 3<sub>3</sub>) консольно посаджені зубчасті колеса 12<sub>1</sub>, 12<sub>2</sub>, що входять у зачеплення.

Коли секції натискної плити знаходяться в нижньому положенні, у робочу зону подають картонну заготовку КЗ. Унаслідок зустрічного обертання валів 11<sub>1</sub> та 11<sub>2</sub> ексцентрики забезпечують піднімання секцій натискної плити. Оскільки ексцентрики другої секції 3<sub>2</sub> натискної плити зміщені на валах відносно ексцентриків першої 3<sub>1</sub>, то спочатку відбувається штанцювання частини картонної заготовки КЗ першою секцією. Після його завершення друга секція забезпечує контакт інструментів форми зі середньою частиною картонної заготовки. Штанцювання картонної заготовки завершується максимальним переміщенням третьої секції.

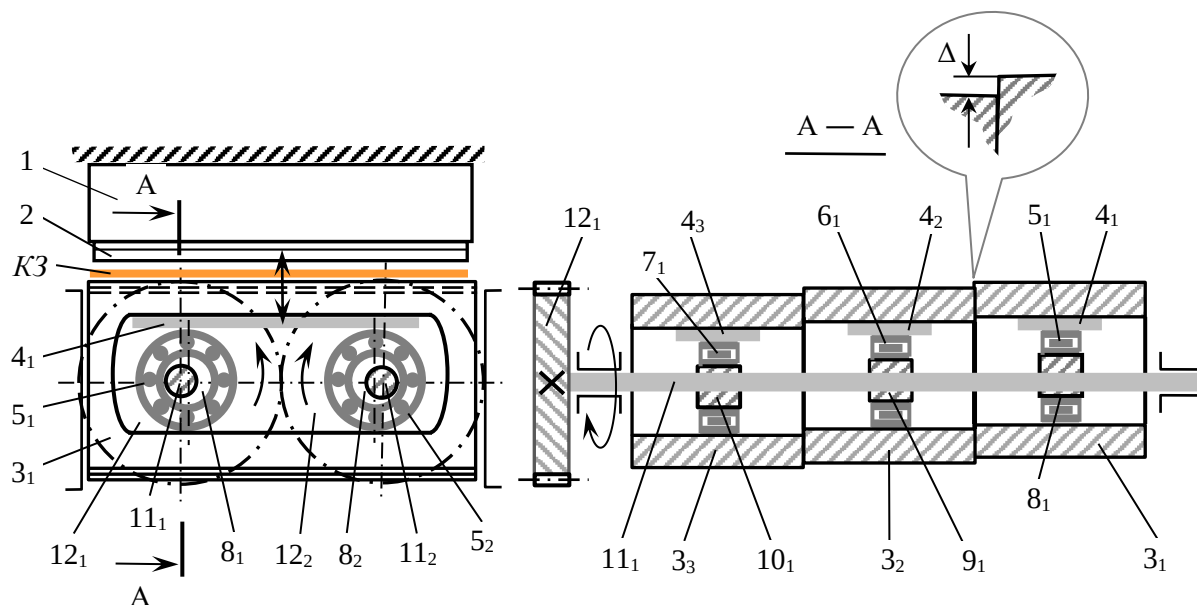


Рис. 1. Схема штанцювального преса з ексцентриковими механізмами привода натискної плити секційної будови

Джерело: розроблено авторами.

Для геометричного синтезу привода натискної плити з використанням ексцентрикових механізмів прийнято позначення відносних параметрів:

- $\Delta_k$  – товщина картонної заготовки;
- $S = 1,0$  – максимальне переміщення («одиничний» лінійний параметр) натискної плити (рис. 2);
- $O_1O_2 = \lambda_e$  – ексцентриситет;
- $\lambda_R$  – радіус ексцентрика;
- $S_0 = \lambda_R - \lambda_e$  – початкове положення секцій натискної плити.

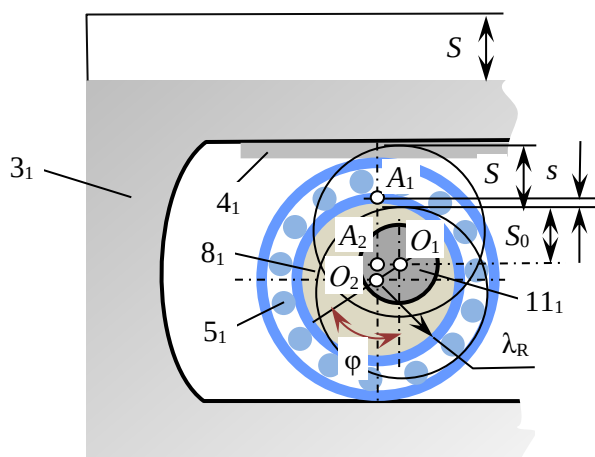


Рис. 2. Схема до геометричного синтезу ексцентрикового механізму та розрахунку переміщення секції натискної плити

Джерело: розроблено авторами.

Лінійне переміщення секції натискної плити:

$$s = \lambda_R - (O_2A_2 + S_0), \quad (1)$$

де  $O_2A_2 = \lambda_e \cdot \cos \varphi$ .

З урахуванням  $S_0$  залежність (1) набуває вигляду:

$$s = \lambda_e (1 - \cos \varphi). \quad (2)$$

З останнього виразу знаходимо значення відносного ексцентриситету  $\lambda_e = 0,5$ .

За залежністю (2) розраховані значення відносного переміщення правої секції натискної плити (секції 3<sub>1</sub> на рис. 1), які графічно зображені на рис. 3 (крива 1).

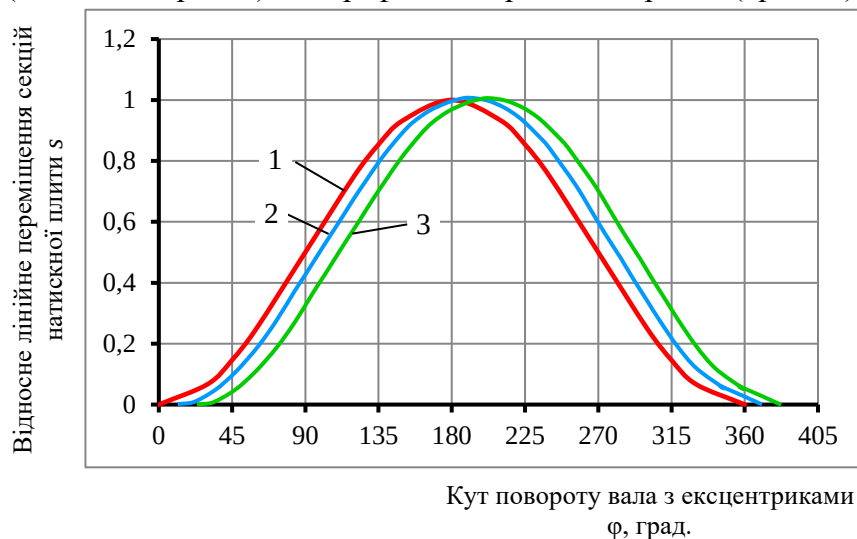


Рис. 3. Графіки залежності відносного лінійного переміщення секцій натискної плити: правої (1), середньої (2) та лівої (3) від кута повороту ексцентриків

Джерело: розроблено авторами.

Як видно з рис. 3, графік симетричний, а максимальне відносне лінійне переміщення правої секції натискної плити  $S = 1,0$  отримане для значення кута  $\varphi = 180^\circ$  повороту вала з ексцентриками. Графіки лінійного переміщення середньої (крива 2) та лівої (крива 3) секцій аналогічні графіку переміщення правої секції.

Для реалізації мінімізації пікового навантаження штанцювального преса з ексцентриковим приводом натискної плити приймаємо, що зміщення робочої поверхні її середньої секції відносно поверхні правої секції (у момент максимального переміщення) рівне відносній товщині  $\Delta_k$  картонної заготовки. Реалізація цієї умови забезпечується кутовим зміщенням на валу ексцентриків середньої секції щодо положення ексцентриків правої секції (аналогічно ексцентриків лівої секції відносно положення ексцентриків середньої секції) на кут:

$$\Delta_\varphi = \pi - \arccos \left( 1 - \frac{1 - \Delta_k}{\lambda_e} \right). \quad (3)$$

За залежністю (3) знаходимо, що для  $\Delta_k = 0,01$  (відповідає товщині 1,0 мм картонної заготовки)  $\Delta_\varphi = 11,48^\circ$ . На основі розрахунків встановлено, що в положенні вала  $\varphi = 168,52^\circ$  ексцентрики правої секції підводять натискну плиту з картонною заготовкою до контакту з інструментами штанцювальної форми (точка  $A_1$  (рис. 4) на кривій 1). Взаємодія її інструментів з картоном завершується для кута вала  $\varphi = 180^\circ$  (точка  $A_2$  на кривій 1) з ексцентриками правої секції. У цьому положенні робоча поверхня середньої секції підводить середню ділянку картонної заготовки до інструментів форми (точка  $B_1$  на кривій 2). Поворот вала з ексцентриками середньої секції на кут  $\Delta_\varphi = 11,48^\circ$  спричинює завершення штанцювання середньої ділянки картонної заготовки (точка  $B_2$  на кривій 2). Процес штанцювання лівої ділянки картонної заготовки аналогічний попереднім (крива 3): у точці  $C_1$  – стартове положення, а в точці  $C_2$  – кінцеве.

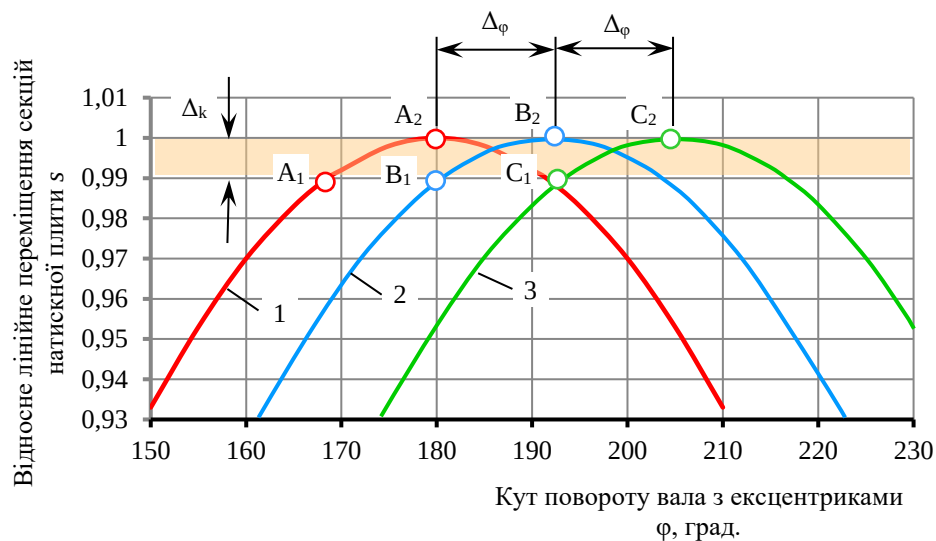


Рис. 4. Графіки залежності відносного лінійного переміщення секцій натискної плити: правої (1), середньої (2) та лівої (3) на завершальному етапі від кута повороту вала з ексцентриками

Джерело: розроблено авторами.

В експлуатаційному застосуванні штанцювальної техніки з використанням пресів з натискною плитою секційної будови важливим параметром налагоджування є встановлення (залежно від товщини картонної заготовки) кутового зміщення ексцентриків сусідніх секцій на приводних валах. За залежністю (3) отримано значення кута зміщення ексцентриків середньої секції (відносно розташування ексцентриків правої секції і, відповідно, кутового розташування ексцентриків лівої секції щодо ексцентриків середньої секції) для різних товщин картонних заготовок з робочим ходом натискної плити  $S = 100$  мм. Результати розрахунків подано графічно на рис. 5.

Як видно з графіка, збільшення товщини картонної заготовки супроводжується аналогічною зміною кутового зміщення ексцентриків сусідніх секцій на приводних валах. Якщо для  $\Delta_k = 0,25$  мм  $\Delta_\phi = 5,73^\circ$ , то для картонної заготовки завтовшки 1,5 мм кутове зміщення ексцентриків сусідньої секції становить  $14,07^\circ$ , що більше майже в 2,5 рази. Передбачається, що діючий прес з використанням натискної плити секційної будови буде укомплектований спеціальним пристроєм, що забезпечує оперативне налагодження ексцентриків з наступною фіксацією на приводних валах.

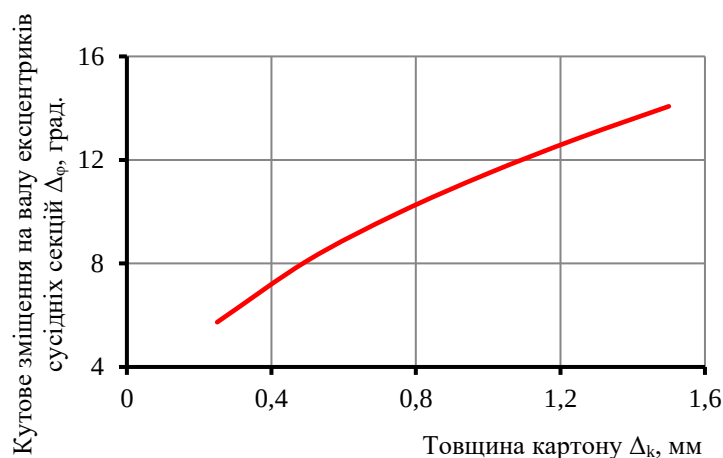


Рис. 5. Графік залежності кутового зміщення на валах ексцентриків сусідніх секцій натискної плити від товщини картону

Джерело: розроблено авторами.

**Висновки.** Збільшення контингенту споживачів, які віддають перевагу товарам на основі паперу та картону, підштовхують компанії до нарощування об'ємів продукування паковань з природних матеріалів. Перший етап у технологічному ланцюжку їх виготовлення базується на штанцюванні розгортки з картонних заготовок у спеціальних пресах. Особливість їх експлуатації пов'язана з переборюванням натискною плитою значних технологічних опорів, що є ключовою обставиною, на основі якої штанцювальні преси класифікують як важконавантажене обладнання.

Мінімізувати пікові навантаження запропоновано шляхом розроблення інноваційного штанцювального преса із застосуванням натискної плити секційної будови замість моноблочної. Кожну сусідню секцію приводять у рух вали, на яких зафіксована пара ексцентриків. Почергове штанцювання секціями натискної плити ділянок картону забезпечується кутовим зміщенням на валах ексцентриків середньої та лівої складових плити. Умова технічної експлуатації преса полягає в тому, що робоча поверхня середньої секції повинна розташовуватися нижче робочої поверхні правої секції (у момент максимального її переміщення) на товщину картонної заготовки. Аналогічне положення повинна займати ліва секція відносно середньої.

На базі використання методики «одиничного» механізму виконано геометричний синтез привода секцій натискної плити, укомплектованого ексцентриковими механізмами. За «еталонний» прийнято параметр лінійного переміщення секцій. Виведено аналітичні залежності та отримано значення кутового зміщення ексцентриків на валах сусідніх секцій для різних товщин картонних заготовок. Виявлено діапазон їх кутового зміщення в межах  $5,73^\circ - 14,07^\circ$  при зміні товщини картону від 0,25 до 1,5 мм.

На кафедрі КППВ проводяться дослідження на розробленому експериментальному стенді, у якому змонтовані секції натискної плити. Для їх привода використано ексцентрикові механізми. Програмою передбачено експериментальні дослідження силового навантаження привода преса при штанцюванні картону різного виду. За результатами досліджень будуть обґрунтовані рекомендації щодо технічного компонування інноваційного штанцювального преса.

### Список використаних джерел

1. Маркетологи інформують... Прогноз розвитку паперової упаковки на 2025 рік. (2025). *Упаковка*, 4, 8-12.
2. Надводнюк, О.В. (2024). Упаковка для перероблених овочів та фруктів (стан та тенденції розвитку). *Упаковка*, 6, 30-33.
3. Регей, І. І. (2011). *Споживче картонне пакування (матеріали, проектування, обладнання для виготовлення)*. УАД.
4. Шредер, В. Л., Пилипенко, С. Ф. (2004). *Упаковка з картону*. ІАЦ «Упаковка».
5. Регей, І. І., Книш, О. Б., Влах, В. В., Михайлів, Ю. Ю., Терновий, А. М. (2025). *Прес штанцювального автомата* (Патент України, №129968). Державна служба інтелектуальної власності України. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1877230/>.
6. Сучасна поліграфічна інженерія: вдосконалення штанцювальних пресів: інтерв'ю з Віталієм Влахом. (2025). *Print plus: папір та поліграфія*, 7, 62-63.
7. Бриндас, А. М., Терницький, С. В. (2025). Конструктивно-технологічні особливості плоскоциліндрового преса для штанцювання розгортки картонних паковань. *Технічні науки та технології*, 2, 108-115.
8. Vlach, V. V. (2023). Comparative analysis of the kinematic parameters of the wedging drive mechanisms of the die-cutting presses using the SolidWorks Software. *Поліграфія і видавнича справа*, 1, 174-183.
9. Четербух, О. Ю., Шахбазов, О. Я., Терницький, С. В. (2024). Аналіз механізмів привода натискної плити плоских штанцювальних пресів. *Наукові записки УАД*, 1, 238-246.
10. Регей, І. І., Влах, В. В., Михайлів, Ю. Ю., Млинко, О. І. (2023). Застосування двосекційної натискної плити у пресі штанцювального автомата: перспективи відмови від моноблочної конструкції. *Наукові записки УАД*, 2, 239-248.



11. Casaburo, A., Petrone, G., Franco, F., De Rosa, S. (2019). A Review of Similitude Methods for Structural Engineering. *Applied Mechanics Reviews*, 71(3): 030802. <https://doi.org/10.1115/1.4043787>.

### References

1. Marketolohy informuiut...Prohnoz rozvytku paperovoi upakovky na 2025 rik [Marketers inform... Paper packaging development forecast for 2025]. (2025). *Upakovka – Packaging*, 4, 8–12.
2. Nadvodniuk, O. V. (2024). Upakovka dlia pereroblenykh ovochiv ta fruktiv (stan ta tendentsii rozvytku) [Packaging for processed vegetables and fruits (status and development trends)]. *Upakovka – Packaging*, 6, 30–33.
3. Rehei, I. I. (2011). Spozhyvche kartonne pakovannia (materialy, proektuvannia, obladnannia dlia vyhotovlennia) [Consumer cardboard packaging (materials, design, manufacturing equipment)]. UAD.
4. Shreder, V. L., & Pylypenko, S. F. (2004). *Upakovka z kartonu* [Cardboard packaging]. IAC «Upakovka».
5. Rehei I. I., Knysh O. B., Vlach V. V., Mykhailiv Yu. Yu., & Ternovyi A. M. (2025). Pres shtantsiuvalnoho avtomata [Die-cutting press]. (Ukrainian patent, № 129968). <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1877230>.
6. Suchasna polihrafichna inzheneriia: vdoskonalennia shtantsiuvanykh presiv: Interv'iu z Vitaliiem Vlakhom [Modern Printing Engineering: Improving Die-Cut Presses: Interview with Vitaliy Vlah]. (2025). *Print plus: papir ta polihrafiia – Print plus: paper and printing*, 7, 62–63.
7. Bryndas, A. M., & Ternytskyi, S. V. (2025). Konstruktyvno-tekhnologichni osoblyvosti ploskotsylindrovoho presa dlia shtantsiuannia rozghortok kartonnykh pakovan [Design and technological features of the flat cylinder press for die-cutting of paper board packaging cut-outs]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 2, 108–115.
8. Vlach, V. V. (2023). Comparative analysis of the kinematic parameters of the wedging drive mechanisms of the die-cutting presses using the SolidWorks Software. *Polihrafiia i vydavnycha sprava – Printing and publishing*, 1, 174–183.
9. Cheterbukh, O. Yu., Shakhbazov, O. Ya., & Ternytskyi, S. V. (2024). Analiz mekhanizmiv pryvoda natysknoi plyty ploskikh shtantsiuvialnykh presiv [Analysis of the pressure plate drive mechanisms of flat die-cutting presses]. *Naukovi zapysky UAD – Scientific notes of UAD*, 1, 238–246.
10. Rehei, I. I., Vlach, V. V., Mykhailiv, Yu. Yu., & Mlynko, O. I. (2023). Zastosuvannia dvosektsiinoi natysknoi plyty u presi shtantsiuvialnoho avtomata: perspektyvy vidmovy vid monoblochnoi konstruktsii [The use of a two-section pressure plate in the die cutting press: possibilities for abandoning the monoblock design]. *Naukovi zapysky UAD – Scientific notes of UAD*, 2, 239–248.
11. Casaburo, A., Petrone, G., Franco, F., De Rosa, S. (2019). A Review of Similitude Methods for Structural Engineering. *Applied Mechanics Reviews*, 71(3): 030802. <https://doi.org/10.1115/1.4043787>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.12.2025

UDC 686.12.056

**Ivan Rehei<sup>1</sup>, Yuriy Mykhailiv<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: [Ivan.I.Rehei@lpnu.ua](mailto:Ivan.I.Rehei@lpnu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3395-2994>.

Scopus Author ID: 57209409155

<sup>2</sup>Graduate Student of the Department of Computerized Complexes of Printing and Packaging Industries

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

E-mail: [Yurii.Y.Muhailiv@lpnu.ua](mailto:Yurii.Y.Muhailiv@lpnu.ua)

### DEVELOPMENT OF AN INNOVATIVE DIE-CUTTING PRESS WITH AN ECCENTRIC DRIVE OF A SECTIONAL PRESSURE PLATE

*It has been established that modern die-cutting equipment has reached an advanced operational level. At the same time, it is classified as heavy-duty machinery due to the press overcoming significant technological resistances. A number of scientific publications related to the research topic have been analyzed. The emphasis is placed on the relevance of minimizing peak load forces in die-cutting presses.*

*An innovative solution is proposed, namely: replacing the monoblock construction of the press platen with a sectional design. The platen sections are hollow and tightly fitted in the direction of cardboard blank transport. The use of eccentric mechanisms, located inside the sections, is considered for driving the platen sections. A geometric synthesis of the eccentric mechanism has been carried out. The stroke of the platen was taken as the “unit” criterion. The application of this methodology enables the design of uniform-type die-cutting presses across a wide range of formats. The motion of the platen sections during the die-cutting process of cardboard blanks has been studied. The nature of section displacement throughout the cycle has been identified. Die-cutting of cardboard blanks of varying thickness requires a specific angular adjustment of the eccentrics on the drive shafts. The following condition is justified: die-cutting of the next area of the blank must occur only after the previous area has been fully die-cut. Analytical dependences for calculating the adjustment parameter of the eccentrics on the drive shafts have been derived. Specific values of angular displacement for each platen section have been obtained. Die-cutting of cardboard blanks with a thickness of 0.25–1.5 mm has been considered, and the corresponding range of eccentric angular displacement on the shafts has been determined.*

*The importance of continuing research on an experimental test stand is emphasized. It is planned to obtain the force parameters of cardboard die-cutting using a sectional-type platen.*

**Keywords:** packaging; die-cutting equipment; die-cutting press; die-cutting forme; eccentric mechanism; cardboard blank; platen section; geometric synthesis.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-29-42](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-29-42)

УДК 621.0, 658.512

**Юрій Іванович Адаменко<sup>1</sup>, Сергій Володимирович Майданюк<sup>2</sup>,  
Олександр Анатолійович Плівак<sup>3</sup>, Сергій Вікторович Лапковський<sup>4</sup>,  
Володимир Костянтинівич Фролов<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)  
**E-mail:** [yuriy.adamenko@ukr.net](mailto:yuriy.adamenko@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206>. **Researcher ID:** ACT-0127-2022

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)  
**E-mail:** [maysv3@gmail.com](mailto:maysv3@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. **Researcher ID:** J-7542-2017

<sup>3</sup>завідувач 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](mailto:aplivak@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3680-8485>. **Researcher ID:** J-7541-2017

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)  
**E-mail:** [Lapkovsky@ukr.net](mailto:Lapkovsky@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **Researcher ID:** HCH-3837-2022

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування  
Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)  
**E-mail:** [v.k.frolov@gmail.com](mailto:v.k.frolov@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **Researcher ID:** ACH-0071-2022

## **МЕТРОЛОГІЧНА ЕКСПЕРТИЗА ТА НОРМОКОНТРОЛЬ КОНСТРУКТОРСЬКОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ В УМОВАХ МАЛИХ ТА СЕРЕДНІХ ПІДПРИЄМСТВ**

У сучасному машинобудуванні, особливо в умовах малих та середніх підприємств, важливим є якість та собівартість продукції, на які безпосередньо впливає якість та узгодженість розробленої конструкторської та технологічної документації, її відповідність чинним стандартам та нормативним документам. Для оцінки якості конструкторської документації проводиться метрологічна експертиза і нормоконтроль документації, проте, існують ряд проблем: неузгодженість, а, подекуди, і відсутність, нормативних національних та міжнародних стандартів, а в умовах малих та середніх підприємств також ще й обмежений людський і фінансовий ресурс. У статті наводяться типові недоліки та помилки, виявлені під час метрологічної експертизи та нормоконтролю креслеників, та сформовано рекомендації щодо унормування організації та підвищення якості проведення метрологічної експертизи та нормоконтролю конструкторської документації в умовах малих та середніх підприємств, з метою підвищення якості конструкторської документації.

**Ключові слова:** метрологічна експертиза; нормоконтроль; конструкторська документація; стандарти; ISO; ЄСКД; помилки; кресленик; допуски.

Рис.: 6. Бібл.: 27.

**Актуальність теми дослідження.** Метрологічна експертиза та нормоконтроль конструкторської документації мають важливе значення для підвищення якості та конкурентоздатності продукції, зниження витрат, ефективного управління виробництвом, оптимізації виробничих процесів. Для кооперації з вітчизняними та зарубіжними партнерами надзвичайно важливо, щоб конструкторська документація відповідала вимогам чинних національних і міжнародних стандартів та інших нормативних документів. Представлені в документації специфікації до геометричних параметрів деталей та складаних одиниць повинні бути чіткими, повними й достатніми (без надмірної інформації) та мати зрозуміле й однозначне трактування. Метрологічна експертиза та нормоконтроль конструкторської документації є не формальною процедурою, а важливим інструментом для підтримання необхідного рівня якості та надійності продукції. Для малих та середніх підприємств особливість проведення експертиз полягає в обмеженому доступі до людських та фінансових ресурсів, що потребує особливих підходів в їх організації та проведенні.

**Постановка проблеми.** До недавнього часу основною нормативною базою, що встановлює норми, вимоги та правила, щодо розробки, оформлення і обігу конструкторської документації була система стандартів ЄСКД. Конструкторська документація за стандартами ЄСКД розроблялась та використовувалась на всіх етапах життєвого циклу виробів машинобудування, тобто під час їх проєктування, виготовлення, контролю, експлуатації,

ремонту та утилізації. Проте, на сьогодні, більшість стандартів ЄСКД втратила чинність в Україні. Зокрема з 86 стандартів, які належать до груп 0-6 (0 Загальні положення; 1 Основні положення; 2 Класифікація та позначення виробів у конструкторських документах; 3 Загальні правила виконання креслень; 4 Правила виконання креслеників виробів машинобудування та приладобудування; 5 Правила обігу конструкторських документів; 6 Правила виконання експлуатаційної та ремонтної документації) чинними є лише 21 стандарт [1]. На заміну стандартів ЄСКД в Україні набрали чинності відповідні стандарти ISO. Проте більшість з цих стандартів прийняті мовою оригіналу, тобто англійською, і українською мовою не перекладені. Це ускладнює використання міжнародних стандартів, особливо в частині застосування термінології і визначення понять. Для однозначного розуміння конструкторських документів важливо використовувати актуальні версії міжнародних стандартів, оскільки стандарти ISO переглядаються кожні п'ять років.

Виникає запитання за якими саме документами проводити метрологічну експертизу та нормоконтроль в галузі машинобудування. На теперішній час «ДСТУ-Н РМГ 63:2013 Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювання під час керування технологічними процесами. Метрологічна експертиза технічної документації (РМГ 63-2003)» [2] є чинним, «ДСТУ ГОСТ 3.1116:2014 ЄСТД. Нормоконтроль» [3] діє, але з 01.01.2026 буде скасовано, «ГОСТ 2.111-68 ЕСКД. Нормоконтроль» [4] втратив чинність в Україні з 01.01.2020. Таким чином, можна стверджувати, що нормативна база вже застаріла або відсутня. У більшості випадків використовують стандарти, які втратили чинність, як методичні рекомендації, а в деяких галузях, наприклад, в НАН України, міністерстві оборони України тощо розробляють відповідні національні та галузеві стандарти. Зокрема 02.01.2026 набуде чинності «ДСТУ В 3263:2025 Озброєння та військова техніка. Експертиза щодо виконання метрологічних вимог. Основні положення».

Іншою проблемою проведення метрологічної експертизи й нормоконтролю на малих і середніх підприємствах є обмеженість людських і фінансових ресурсів. На малих і середніх підприємствах часто відсутня метрологічна служба, виокремлена служба нормоконтролю, що потребує суміщення функцій для проведення внутрішньої експертизи конструкторської документації. Обмеженість фінансових ресурсів ускладнює доступ до оновлення нормативної бази (актуальних міжнародних стандартів).

Якщо взяти лише дві категорії стандартів ISO GPS: фундаментальні (вони визначають правила та принципи, що застосовуються до всіх категорій геометричних властивостей виробів) та загальні (вони застосовуються до однієї або кількох категорій геометричних властивостей), то найважливіші з них, а це приблизно два десятки стандартів, на сайті Національного органу стандартизації ДП «УкрНДНЦ» [1] коштують понад 135000 грн.

І це окрім додаткових стандартів, які стосуються конкретних виробничих процесів або конкретних елементів машин, зокрема, різьби, підшипників кочення і ковзання, шпоноків, шліцьових, штифтових з'єднань, зубчастих коліс і передач тощо. Однак є ще близько семи десятків стандартів групи ISO «Кресленики технічні». Таким чином, мати на підприємстві повну базу необхідних стандартів для розробки конструкторської документації та її експертизи коштує дорого (кілька сотень тисяч гривень залежно від спеціалізації підприємства). Ще варто відзначити, що стандарти переглядається та доповнюються кожні п'ять років. Очевидно, що не кожне підприємство має можливість регулярно оновлювати базу актуальних нормативних документів. На малих та середніх підприємствах через обмеженість фінансових можливостей це зробити ще важче.

Залучення спеціалістів з інших організацій для проведення зовнішньої експертизи конструкторської документації теж потребує додаткових фінансових витрат.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Низка друкованих робіт присвячена теоретичному обґрунтуванню питань організації метрологічної експертизи та нормоконтролю. У роботі [5] розглянуто процеси технічного контролю конструкторської документації (технологічного, метрологічного, нормативного). На основі нормативних документів [3], [4], [6-8] розглянуто предмет, об'єкти, цілі, етапи та зміст технологічного, метрологічного, нормативного контролю. Підкреслюється важливість технічного контролю для забезпечення заданого рівня якості виробів, зниження ризиків, підвищення ефективності виробництва, залучення нових клієнтів. Запропоновано організаційні заходи, направлені на вирішення цих задач.

Як зазначається в роботі [9], у межах метрологічного забезпечення виробництва проводиться метрологічна експертиза конструкторської та технологічної документації згідно з МІ 1325-86 [10], метою якої є аналіз і оцінка технічних рішень щодо вибору параметрів, які підлягають вимірюванням, встановленню норм точності та забезпеченню методами та засобами вимірювань процесів розробки, виготовлення, експлуатації та ремонту виробів. Підкреслюється необхідність аналізу результатів метрологічної експертизи та врахування зауважень. Для цього необхідно мати кваліфікований персонал у всіх відділах (метрологічному, конструкторському, технологічному, випробувальному) і постійно проводити роботу щодо підвищення його кваліфікації.

У статті [11] розглянуті законодавчі та рекомендовані директивні документи, які регламентують вимоги та надають рекомендації щодо проведення метрологічної експертизи технічної документації. Окреслені задачі метрологічної експертизи та умови, яким повинна відповідати розроблена технічна документація. Проведена паралель між метрологічним контролем та метрологічною експертизою в умовах виробництва й розтлумачена перевага проведення метрологічної експертизи документації при розробці та виготовленні виробів для забезпечення їх ефективної експлуатації.

У роботі [12] проведено аналіз сучасного стану системи метрологічної експертизи документації озброєння та військової техніки. На основі проведеного аналізу виявлені основні недоліки та надані рекомендації щодо удосконалення процесу організації проведення метрологічної експертизи в ЗС України. Врахування наданих рекомендацій зменшує часові витрати на організацію вказаних робіт та усуває суперечності між розробниками та споживачем (в особі ЗС України) щодо виконання вимог з прийняття на озброєння військової техніки.

У статті [13] автори формулюють завдання процесу метрологічного забезпечення озброєння та військової техніки на всіх стадіях його життєвого циклу: 1) дослідження та обґрунтування необхідності розробки (розробка технічної пропозиції; розробка, узгодження та затвердження технічного завдання); 2) розробка (розробка ескізного проєкту; розробка технічного проєкту; розробка конструкторської документації; виготовлення дослідного зразка озброєння (складової частини) та проведення попередніх випробувань; підготовка до державних випробувань; державні випробування); 3) виробництво; 4) експлуатація; 5) капітальний ремонт; 6) утилізація.

Автори роботи [14] виконали дослідження аспектів нормативно-правового забезпечення організації та проведення метрологічної експертизи документації на вироби озброєння та військової техніки та розробили низку рекомендацій щодо внесення змін у нормативні та керівні документи для приведення їх у відповідність до сучасних вимог та законодавства України. Робота [15] присвячена впровадженню нових стандартів ISO щодо оформлення конструкторської документації в навчальний процес та виробництво.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Стандарти системи ЄСКД дають загальні рекомендації з організації метрологічної експертизи та нормоконтролю і не враховують специфіки малих і середніх підприємств в умовах кардинальної зміни нормативної бази. Таким чином, існує потреба в уточненні методик організації та проведення експертиз в умовах малих і середніх підприємств. В літературі бракує інформації

щодо досвіду впровадження нових стандартів у виробництво та аналізу типових помилок у конструкторських документах. Важливим є виявлення типових помилок та їх врахування під час оформлення конструкторських документів. Усунення помилок, безумовно, сприяє підвищенню якості конструкторських документів.

**Метою статті** є розробка рекомендацій щодо організації та проведення метрологічної експертизи та нормоконтролю конструкторської документації в умовах малих та середніх підприємств у перехідний період від стандартів ЄСКД ГОСТ до міжнародних та національних стандартів, коли за однією і тією ж темою одночасно є чинними нормативні документи з відмінними між собою визначеннями, правилами, позначками. Коректне застосування та узгодження стандартів у конструкторській документації відкриває шлях до вітчизняної та міжнародної кооперації, технічного та наукового співробітництва.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо особливості метрологічної експертизи та нормоконтролю саме в умовах малих та середніх підприємств. Очевидно, що між цими експертизами є певний зв'язок.

Згідно з ДСТУ 3321:2003 [7] нормоконтроль – це процес контролювання виконання конструкторської документації згідно з нормами, вимогами і правилами, установленими нормативними документами. Нормоконтроль проводять з метою забезпечення однозначності застосування конструкторської документації та встановлених у ній вимог, правил та норм на всіх стадіях життєвого циклу виробу. Одним з основних завдань нормоконтролю є перевірка раціонального застосування обмежувальних номенклатур покупних та стандартизованих виробів та їх документів, норм, марок матеріалів, напівфабрикатів тощо.

Відповідно до РМГ 63:2013 [2] метрологічну експертизу технічної документації проводять шляхом аналізу та оцінювання технічних рішень у частині метрологічного забезпечення (технічних рішень щодо вимірюваних параметрів, встановлення вимог до точності вимірювань, вибору методів та засобів вимірювань, їх метрологічного обслуговування). Тобто одним з основних завдань метрологічної експертизи є встановлення придатності для контролю параметрів, що визначають функціонування виробу. Метрологічна експертиза включає метрологічний контроль технічної документації, який здійснюють шляхом перевірки технічної документації на відповідність конкретним метрологічним вимогам, встановленим у стандартах та інших нормативних документах.

Таким чином, встановлені нормативними документами завдання нормоконтролю і технічної експертизи частково перекриваються. Тому в умовах малих і середніх підприємств цілком логічним є об'єднання нормоконтролю та метрологічної експертизи. Це дозволяє скоротити час на виконання експертизи та виключити зайве дублювання.

Залежно від поставлених завдань метрологічна експертиза та нормоконтроль проводять на формальному або функціональному рівнях.

Під час проєктування продукту чи розробки технологічних процесів формальна експертиза має на меті контроль дотримання вимог чинних стандартів та інших нормативних документів, а також перевірку можливості контролю найбільш важливих параметрів виробу, що визначають його працездатність. Врахування зауважень та виправлення помилок, виявлених під час формальної експертизи, звичайно дозволяє уникнути браку та підвищує якість виробу.

На функціональному рівні експертизи спрямовані на удосконалення продукту. Тобто метою метрологічної експертизи та нормоконтролю є не лише констатація сильних та слабких сторін проєкту, а й виявлення помилкових чи не зовсім вдалих рішень розробників. У таких випадках експерти надають рекомендації щодо внесення змін у сам об'єкт проєктування чи його частину з метою поліпшення рівня його якості чи зниження витрат на виробництво.

Нормоконтроль та метрологічна експертиза в межах підприємства може відбуватися централізовано або децентралізовано. У першому випадку на підприємстві є окрема спеціалізована служба, яка і виконує нормоконтроль та метрологічну експертизу, у другому випадку експертизу виконують власне інженери-розробники виробів. На малих і середніх підприємствах через кадрові обмеження нормоконтроль та метрологічна експертиза виконується, переважно, власними силами – інженерами конструкторського відділу. У цьому є певні недоліки, але і є переваги. До недоліків слід віднести дещо нижчий рівень інженерів-конструкторів у галузі стандартизації і метрології та процедурах їх проведення. Інженерам-конструкторам через брак часу складніше слідкувати за усіма змінами, що відбуваються у нормативних документах. До переваг виконання експертизи силами інженерів-розробників можна віднести їх глибоку підготовку в галузі проектування виробів, а також високу оперативність у питаннях усунення дефектів та помилок.

Тому для інженерів малих та середніх підприємств дуже важливим є навчання та підвищення кваліфікації у питаннях, що стосуються проведення нормоконтролю та метрологічної експертизи. Непоганим рішенням є підготовка в конструкторському відділі кількох інженерів-експертів, які матимуть спеціальні знання зі стандартизації, нормоконтролю та метрології.

Очевидно, що метрологічна експертиза та нормоконтроль конструкторських документів мають бути виконані у повному обсязі. На наш погляд, доцільним є проведення спочатку формального нормоконтролю, потім функціональної експертизи, метрологічної експертизи й нормоконтролю, а завершитись має остаточною перевіркою метрологічних параметрів.

За результатами метрологічної експертизи та нормоконтролю конструкторської документації можна виділити низку проблем, з якими зіштовхуються підприємства. Зокрема, це перехід від стандартів ГОСТ та ДСТУ ГОСТ до стандартів ДСТУ ISO. Такий перехід вимагає внесення змін до конструкторської документації.

Розглянемо приклад. У вітчизняній промисловості під час призначення посадок, відхилень форми, розташування та шорсткості посадкових поверхонь валів і корпусів, що з'єднуються з підшипниками кочення, використовують ГОСТ 3325-85 [16]. Цей стандарт втратив чинність в Україні лише у 2022 році, тобто ним користувались понад три десятки років, і на підприємствах конструкторська документація добре відпрацьована згідно з вимогами вказаного стандарту.

Розглянемо призначення параметрів точності посадкових поверхонь корпусу за вказаним вище стандартом (рис. 1). Для забезпечення стабільного положення вузла відносно корпусу та компенсації температурних деформацій, отвір під зовнішнє кільце підшипника має розмір  $\varnothing 100\text{ H7}$ . На посадкову поверхню призначають допуски круглості та профілю поздовжнього перерізу, які задаються у радіусному вигляді. Для зменшення перекосу кілець підшипників, який може викликати пошкодження підшипників і порушує складання вузла, призначають допуски співвісності посадкових місць корпусу відносно їх спільної осі. Торцеве биття заплечиків впливає на осьове зміщення внутрішнього і зовнішнього кілець підшипника та, як наслідок, на перекося доріжок кочення. При цьому підвищується опір обертанню підшипника, втрата ККД та додаткове нагрівання підшипникового вузла. Тож на торці заплечиків призначають допуски торцевого биття відносно спільної осі посадкових поверхонь корпусу. Для уникнення зминання мікронерівностей у процесі складання і експлуатації та появи корозії, на посадкові місця під підшипники призначено параметр шорсткості  $Ra\ 1,25\ \mu\text{м}$ , а на торцеві поверхні заплечиків  $Rz\ 20\ \mu\text{м}$ .

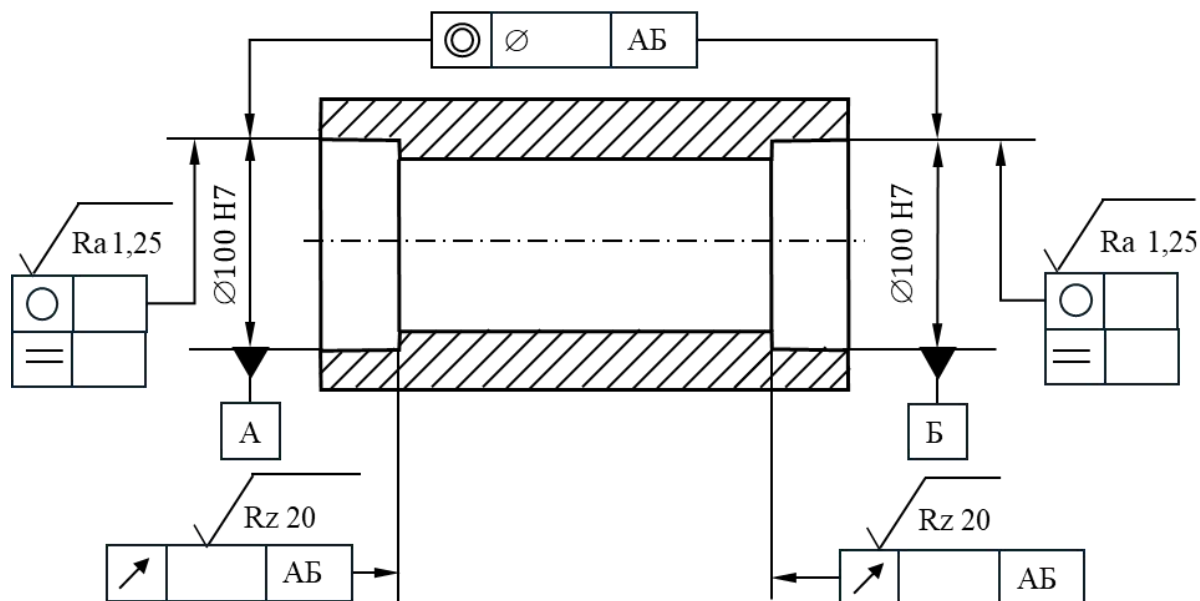


Рис. 1. Призначення параметрів точності елементів корпусу під підшипники кочення за стандартами ДСТУ ГОСТ [16-18].

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 1 позначення допусків форми та розташування поверхонь наведено за ДСТУ ГОСТ 2.308:2013 [17], а позначення шорсткості поверхонь – за ГОСТ 2.309-73 [18]. Стандарт [17] втратив чинність 01.01.2022 р., а стандарт [18] – 01.01.2026 р., тобто з 2026 р. стандарти в Україні вже не діють. На заміну їм введено стандарти ДСТУ EN ISO 1101:2018 [19] та ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20]. Розглянемо, як може виглядати ескіз корпусу під підшипники кочення за стандартами ДСТУ ISO [19, 20].

Щоб забезпечити виконання вказаних вище вимог до форми, розташування та шорсткості посадкових та приєднувальних поверхонь, можна використати різні набори інструментів – види допусків.

Допуск круглості може бути залишений без змін. Допуск профілю поздовжнього перерізу в ДСТУ EN ISO 1101:2018 відсутній. Його можна замінити допуском паралельності твірних. У цьому випадку одна твірна циліндричної посадкової поверхні є базою, а допуск паралельності належить до протилежної твірної. Для позначення допусків паралельності твірних базами можуть бути також осі посадкових поверхонь. Інший варіант – це призначення допуску циліндричності посадкових поверхонь.

Допуск торцевого биття заплечиків може бути залишений без змін, а може бути замінений на допуск повного торцевого биття або на допуски перпендикулярності та площинності.

Допуск співвісності посадкових поверхонь може бути залишений без змін, а може бути замінений на допуск повного радіально биття посадкових поверхонь відносно їх спільної осі. У цьому випадку відпадає необхідність у нормуванні форми посадкових поверхонь, оскільки допуск повного радіального биття є сумарним допуском форми й розташування і включає в себе відхилення від циліндричності (допуск форми) та відхилення від співвісності (допуск розташування). Варто зазначити, що спільна вісь позначається не «АБ», а як система баз через дефіс «А-Б» або «Б-А».

Вибір параметрів шорсткості поверхонь та їх позначення за ГОСТ 2.309-73 [18] та ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20] теж відрізняється. Параметр шорсткості посадкових поверхонь Ra 1,25 (середнє арифметичне відхилення профілю) можна залишити без



змін. Значення 1,25 мкм ми розуміємо як найбільше допустиме значення параметра шорсткості. Проте за ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20] (стандарт є чинним) значення 1,25 мкм за замовчуванням інтерпретують за правилом 16%, тобто 16% вимірних значень можуть перевищувати межу 1,25 мкм. Якщо ж треба позначити найбільше допустиме значення, то слід вказати суфікс max (R<sub>a</sub>max 1,25).

Параметр шорсткості торцевих поверхонь заплечиків R<sub>z</sub> 20, тобто найбільше допустиме значення параметра «висота нерівностей профілю по десяти точках» складає 20 мкм. За ГОСТ 2.309-73 [18] висота нерівностей профілю по десяти точках R<sub>z</sub> – це сума середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю і глибин п'яти найбільших западин профілю в межах базової довжини. За ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20] параметр R<sub>z</sub> – це найбільша висота профілю, яка визначається як сума висоти найбільшого виступу профілю і глибини найбільшої западини профілю в межах базової довжини. Тобто за ГОСТ 2.309-73 [18] і ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20] R<sub>z</sub> – це зовсім різні параметри. У цьому випадку краще відмовитись від параметра R<sub>z</sub> і замінити його відповідним значенням параметра R<sub>a</sub>.

Один із можливих варіантів ескізу корпусу за стандартами ДСТУ ISO представлено на рис. 2.

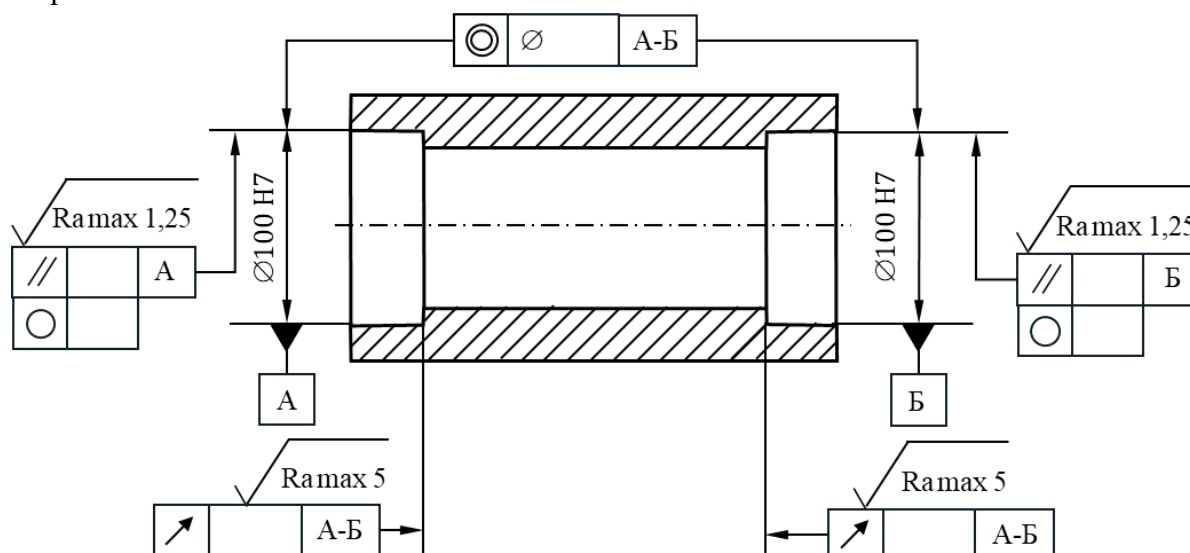


Рис. 2. Призначення параметрів точності елементів корпусу під підшипники кочення за стандартами ДСТУ ISO

Джерело: розроблено авторами за [19; 20].

Важливо підкреслити, що завдання переходу від стандартів ДСТУ ГОСТ до стандартів ДСТУ ISO є багатоваріантним, тобто не існує єдиного правильного рішення. Вибір комплексу нормованих параметрів залежить від рішення конструктора. Прийняття рішення потребує глибоких знань у галузі конструювання, технології, стандартизації та метрології.

На основі метрологічної експертизи та нормоконтролю креслеників у низці малих та середніх підприємств проаналізовано типові недоліки та помилки. Очевидно, що врахування зауважень дозволить краще організувати експертизу та підвищити якість конструкторської документації.

Загальні зауваження.

- Внутрішній нормоконтроль та метрологічну експертизу проводили інженери, які не мали достатньої підготовки в галузі, стандартизації та метрології та не мали достатнього досвіду в організації експертиз.

- Під час проведення експертиз не було чітко сформульовано мету за задачі, зокрема, функціональної експертизи.

- Внутрішній нормоконтроль на підприємствах проводився не завжди за чинними оригінальними стандартами. Через їх відсутність експерти використовували стандарти, які вже втратили чинність, а також вторинні джерела технічної інформації – довідники та спеціальну навчальну технічну літературу. Це є неприпустимим, оскільки не може бути повної впевненості в актуальності та правильності даних в літературних джерелах, адже вони можуть бути застарілими, а під час передрукування тексту можливі помилки.

- Не завжди зрозуміло, за якими саме стандартами проводилась експертиза.

- За результатами експертизи помилки та дефекти не фіксувались на папері, а одразу виправлялись у документах. Відсутність результатів експертизи ускладнює аналіз помилок та налагодження системи їх запобігання.

Типові помилки, виявлені під час виконання креслеників.

- Використовуються масштаби за «ГОСТ 2.302-68 ЕСКД. Масштаби» [21], який вже скасовано. Наприклад, у списку масштабів зменшення [21] закреслені масштаби вже не є чинними, проте все ще зустрічаються в конструкторській документації: 1:2; 1:5; 1:10; 1:20; 1:50; 1:100; 1:200; 1:500; 1:1000.

- На полі кресленика, в технічних вимогах зустрічається багато тексту, наприклад, «фаски», «отв.», «Розміри для довідок» тощо. Проте, згідно з вимогами ДСТУ ISO 128-1:2005 [22] серед принципів, яких треба дотримуватись під час виконання креслеників вказана «мовна незалежність». Тобто кресленики переважно повинні бути незалежними від мови. Слова слід використовувати тільки в графах основного напису або в тих випадках, коли неможливо подати інформацію графічно.

- Не завжди вірно вибраний тип ліній, наприклад, лінію згину листових заготовок часто позначають тонкою пунктирною лінією, проте її треба позначати суцільною тонкою лінією (рис. 3). Граничні положення рухомих частин теж часто позначають тонкою пунктирною лінією, але її треба позначати тонкою вузькою лінією з довгими штрихами й подвійними крапками (див. табл. 1 [23]) (рис. 4).

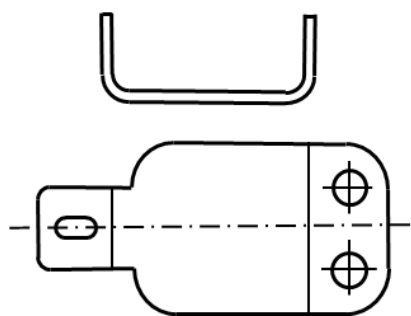


Рис. 3. Позначення лінії згину пластини

Джерело: розроблено авторами.

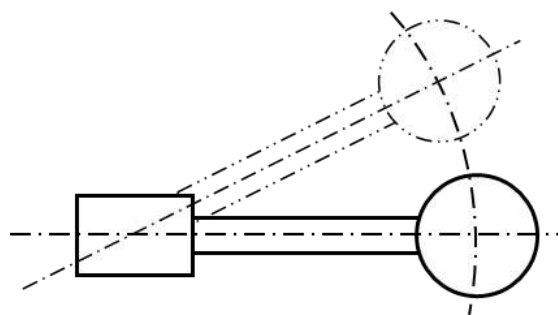


Рис. 4. Позначення положення ручки перемикання

Джерело: розроблено авторами.

- Часто неправильно вказані допоміжні, позамасштабні та теоретично точні розміри (рис. 5). Розмір 24 мм у рамці – теоретично точний, розмір 30 мм в дужках – допоміжний, розмір 40 мм підкреслений – позамасштабний [24].

- У ряді випадків невірно вказана товщина листового матеріалу, наприклад,  $s=3$  мм (рис. 3, а) чи  $\delta=3$  мм, а має бути  $t=3$  (рис. 6) [24].

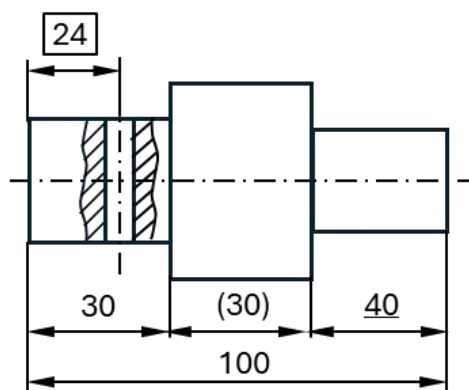


Рис. 5. Позначення розмірів  
Джерело: розроблено авторами.

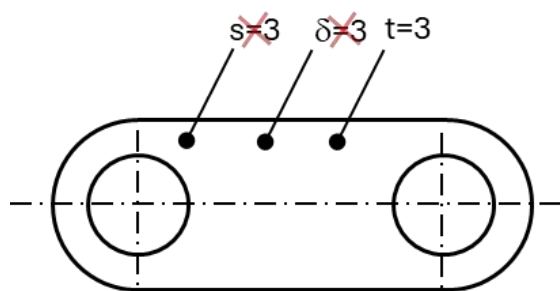


Рис. 6. Позначення товщини пластини  
Джерело: розроблено авторами.

Типові помилки під час позначення допусків форми та розташування поверхонь.

- Певна складність полягає в тому, що чинними одночасно були два стандарти: ДСТУ ГОСТ 2.308:2013 [17] (система ЄСКД) та ДСТУ EN ISO 1101:2018 [19] (система GPS). При тому, що за змістом стандарти відрізняються.

- У ряді випадків відсутня кореляція між допусками форми та допусками розмірів поверхонь залежно від рівнів відносної геометричної точності А, В, С (у такому випадку не застосовувались принципи стандартів ISO GPS, зокрема, принцип незалежності, який полягає у тому, що допуски розміру і допуски форми є незалежними).

- Допуски на типові деталі та з'єднання (шпонкові, штифтові, шліцьові з'єднання) не відповідали стандартам на ці вироби.

- Невірно були вибрані бази, наприклад, для вала, що обертається у двох кулькових підшипниках, для позначення допуску співвісності осей посадкових поверхонь за базу була прийнята вісь центрів.

- Недостатньо використовувались залежні допуски, які мають економічні переваги порівняно з допусками незалежними, наприклад, для кришок.

Типові помилки під час призначення та позначення параметрів шорсткості поверхонь.

- У ряді випадків відсутня кореляція між макро- та мікрогеометрією поверхні деталі.

- Прийняті значення параметрів шорсткості поверхонь для типових деталей з'єднань (шпонкових, шліцьових, штифтових з'єднань, посадкових місць під підшипники кочення тощо), не відповідали рекомендованим значенням, вказаним у відповідних стандартах.

- На кресленику часто не вказано, за яким стандартом призначаються параметри шорсткості поверхонь, наприклад, за ГОСТ 2.309-73 [18] або за ДСТУ EN ISO 1302:2018 [20].

Типові помилки під час метрологічної експертизи.

- Загальні допуски на лінійні та кутові розміри без індивідуального допуску, наприклад, «Отвори: +H14, вали: -h14, решта:  $\pm IT14/2$ » призначені за ГОСТ 25670-83 [25], який в Україні втратив чинність з 2019 року. Замість цього стандарту варто застосовувати ДСТУ ISO 2768-1 [26], та ДСТУ ISO 2768-2 [27], які є чинними. Тоді запис набуває вигляду, наприклад: «ISO 2768-mK». Це означає, що загальні допуски на лінійні та кутові розміри встановлено за середнім класом допуску m, а загальні допуски на геометричні елементи (допуски форми й розташування) призначено за класом допуску K.

- Вимогу «Гострі кромки притупити» виконати неможливо, бо відсутнє значення радіуса заокруглення кромки.

- Засоби вимірювання підбиралися не за величиною допустимої похибки, а на основі величини ціни поділки шкали чи дискретності цифрового відлікового пристрою. Наприклад, для цифрового штангенциркуля з дискретністю 0,01 мм, приймалося, що «точність» приладу складає 0,01 мм у всьому діапазоні вимірювання, що є невірним.

- Для контролю деталей використовувались прилади без попереднього калібрування.

Наведений перелік зауважень та помилок, звичайно не є вичерпним. Виконуючи аналіз типових помилок, автори ставили за мету привернути увагу спеціалістів до питання кардинальної зміни нормативної бази та необхідності узгодження різних стандартів, аби будь-який елемент кресленника був однозначно інтерпретований і однозначно сприйнятий кожним користувачем.

**Висновки.** Малим та середнім підприємствам можна рекомендувати проводити одночасно метрологічну експертизу та нормоконтроль для економії ресурсів та часу.

На підприємстві доцільно постійно виконувати внутрішню технічну експертизу конструкторської документації силами власних, відповідно підготовлених, спеціалістів. Періодично (особливо під час розробки нового виробу) доцільно долучати до технічної експертизи зовнішніх експертів із числа інженерів-конструкторів, профільних спеціалістів з державних та комерційних установ. При цьому важливо експертам ставити чіткі цілі та завдання.

Слід чітко вказувати нормативні документи (міжнародні, міждержавні, національні, корпоративні тощо), які використовуються у конструкторській та технологічній документації. Для розробки повних детальних специфікацій та розширення міжнародної співпраці варто якомога ширше використовувати стандарти ISO GPS.

В умовах переходу від стандартів ДСТУ ГОСТ до стандартів ДСТУ ISO для малих та середніх підприємств доцільно розробляти внутрішні корпоративні стандарти (стандарти підприємства) щодо розробки та оформлення конструкторської документації на новій нормативній базі. При цьому важливо слідкувати за змінами, що відбуваються в стандартах та інших нормативних документах та періодично оновлювати їх. До цього процесу доцільно залучати спеціалістів з інших організацій, які мають відповідні знання та здатні розробляти стандарти з урахуванням специфіки конкретного виробництва.

Необхідно налагодити на підприємствах систему навчання і підвищення кваліфікації спеціалістів у галузі стандартизації, метрології та організації експертизи. Зауваження та висновки експертів за результатами експертиз необхідно доводити до виконавців – інженерів-проектувальників, з метою виявлення і запобігання типових дефектів та помилок.

Доцільно провести подальші дослідження проблем щодо імплементації положень стандартів ISO GPS у практику проєктування, виробництва та верифікації виробів на вітчизняних підприємствах.

### Список використаних джерел

1. Національний орган стандартизації. (2025). Офіційний сайт. Retrieved December 2, 2025, from <https://uas.gov.ua/>
2. ДСТУ-Н РМГ 63:2013. (2013). Метрологія. Забезпечення ефективності вимірювання під час керування технологічними процесами. Метрологічна експертиза технічної документації. Мінекономрозвитку України.
3. ДСТУ ГОСТ 3.1116:2014. (2014). Єдина система технологічної документації. Нормоконтроль. Мінекономрозвитку України.
4. ГОСТ 2.111-68. (1971). ЕСКД. Нормоконтроль. Издательство стандартов.
5. Шорнікова, С. В. (2025). Технічний контроль конструкторської документації – запорука випуску високоякісної продукції. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 36(75)(1), 22–28. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/04>.
6. ДСТУ 3974-2000. (2000). Система розроблення та поставлення продукції на виробництво. Правила виконання дослідно-конструкторських робіт. Держстандарт України.

7. ДСТУ 3321:2003. (2005). *Система конструкторської документації. Терміни та визначення основних понять*. Держспоживстандарт України.
8. ДСТУ 2682-94. (1994). *Державна система забезпечення єдності вимірювань. Метрологічне забезпечення*. Держстандарт України.
9. Павленко, В. Я. (2024). Ефективність метрологічного забезпечення підготовки виробництва на підприємстві. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74)(6), 14–19. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/03>.
10. МИ 1325-86. (1986). *Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическая экспертиза конструкторской и технологической документации. Методические указания*.
11. Чайковський, С. Ю. (2024). Метрологічна експертиза технічної документації – гарант виготовлення якісної продукції. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74)(6), 35–39. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/07>.
12. Аркушенко, П. Л. (2019). Аналіз сучасного стану системи метрологічної експертизи озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць ДНДІ випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 1, 23–26.
13. Биченков, В., Коцюрба, В., & Власов, І. (2021). Метрологічне забезпечення озброєння та військової техніки на стадіях його життєвого циклу. *Social Development and Security*, 11(5), 111–118. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.11>.
14. Бойко, В. М., Ноженко, О. М., Меркулов, О. А., Герасимов, С. В., Кірвас, В. В., & Зубрицький, Г. М. (2021). Дослідження аспектів нормативно-правового забезпечення організації та проведення метрологічної експертизи документації на вироби озброєння та військової техніки. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 4(70), 95–104. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.70.14>.
15. Черніков, О. В. (2024). Впровадження нових стандартів оформлення конструкторської документації в навчальний процес та виробництво. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*, 1(106), 241–251. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2024.106>.
16. ГОСТ 3325-85. (1987). *Подшипники качения. Поля допусков и технические требования*. Издательство стандартов.
17. ДСТУ ГОСТ 2.308:2013. (2015). *Єдина система конструкторської документації. Зазначення допусків форми та розміщення поверхонь*. Мінекономрозвитку України.
18. ГОСТ 2.309-73. (2007). *ЕСКД. Обозначения шероховатости поверхностей*. Издательство стандартов.
19. ДСТУ EN ISO 1101:2018. (2018). *Технічні вимоги до геометричних характеристик продукції*. ДП «УкрНДНЦ».
20. ДСТУ EN ISO 1302:2018. (2018). *Позначення зовнішньої текстури в технічній документації*. ДП «УкрНДНЦ».
21. ГОСТ 2.302-68. (2007). *ЕСКД. Масштабы*. Издательство стандартов.
22. ДСТУ ISO 128-1:2005. (2001). *Кресленики технічні. Загальні принципи оформлення. Частина 1*. Держспоживстандарт України.
23. ДСТУ ISO 128-24:2018. (2018). *Кресленики технічні. Загальні принципи подання. Частина 24*. ДП «УкрНДНЦ».
24. ДСТУ EN ISO 129-1:2022. (2022). *Кресленики технічні. Проставлення розмірів і допусків. Частина 1*. ДП «України».
25. ГОСТ 25670-83. (1984). *Основные нормы взаимозаменяемости. Предельные отклонения размеров*. Издательство стандартов.
26. ДСТУ ISO 2768-1:2021. (2003). *Основні допуски. Частина 1*. Держстандарт України.
27. ДСТУ ISO 2768-2:2001. (2003). *Основні допуски. Частина 2*. Держстандарт України.

## References

1. Natsionalnyi orhan standartyzatsii [National standardisation body]. (2025). *Ofitsiyniy sait – Official website*. <https://uas.gov.ua>.

2. DSTU-N RMG 63:2013. (2013). Metrolohiia. Zabezpechennia efektyvnosti vymiriuvannia pid chas keruvannia tekhnolohichnymi protsesamy. Metrolohiichna ekspertyza tekhnichnoi dokumentatsii. [Metrology. Ensuring measurement efficiency during technological process control. Metrological examination of technical documentation]. *Minekonomrozyvku Ukrainy – Ministry of Economic Development of Ukraine*.

3. DSTU GOST 3.1116:2014. (2014). Yedyna systema tekhnolohichnoi dokumentatsii. Normo-kontrol [Unified system of technical documentation. Regulatory control]. *Minekonomrozyvku Ukrainy – Ministry of Economic Development of Ukraine*.

4. GOST 2.111-68. (1971). ESKD. Normokontrol [Regulatory control]. *Izdatelstvo standartov – Publishing of standards*.

5. Shornikova, S. V. (2025). Tekhnichniy kontrol konstruktorskoï dokumentatsii – zaporuka vypusku vysokoiakisnoi produktsii [Technical control of design documentation is the key to producing high-quality products]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 36(75)(1), 22–28. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/04>.

6. DSTU 3974-2000. (2000). Systema rozroblennia ta postavlennia produktsii na vyrobnytstvo. Pravyla vykonannia doslidno-konstruktorskykh robot [System for developing and delivering products to production. Rules for performing research and development work]. *Derzhstandart Ukrainy – State Standard of Ukraine*.

7. DSTU 3321:2003. (2005). Systema konstruktorskoï dokumentatsii. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat. [Design documentation system. Terms and definitions of basic concepts.] *Derzhspozhyvstandart Ukrainy. - State Consumer Standards of Ukraine*.

8. DSTU 2682-94. (1994). Derzhavna systema zabezpechennia yednosti vymiriuvan. Metrolohiichne zabezpechennia. [State system for ensuring measurement uniformity. Metrological support.] *Derzhspozhyvstandart Ukrainy. - State Consumer Standards of Ukraine*.

9. Pavlenko, V. Ya. (2024). Efektyvnist metrolohiichnoho zabezpechennia pidhotovky vyrobnytstva na pidpriemstvi. [The effectiveness of metrological support for production preparation at the enterprise.] *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(74)(6), 14–19. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/03>.

10. MI 1325-86. (1986). State system for ensuring uniformity of measurements. Metrological examination of design and technological documentation. Methodological guidelines.

11. Chaikovskiy, S. Yu. (2024). Metrolohiichna ekspertyza tekhnichnoi dokumentatsii – harant vyhotovlennia yakisnoi produktsii [Metrological examination of technical documentation – a guarantee of high-quality product manufacturing]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky – Scientific Notes of V. I. Vernadsky Ternopil National University. Series: Technical Sciences*, 35(74)(6), 35–39. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.1/07>.

12. Arkushenko, P. L. (2019). Analiz suchasnoho stanu systemy metrolohiichnoi ekspertyzy ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Analysis of the current state of the metrological examination system for weapons and military equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats DNDI vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki – Collection of scientific papers by the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, 1, 23–26.

13. Bybychenkov, V., Kotsiura, V., & Vlasov, I. (2021). Metrolohiichne zabezpechennia ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki na stadiakh yoho zhyttievoho tsyklu [Metrological support for weapons and military equipment at various stages of their life cycle]. *Social Development and Security*, 11(5), 111–118. <https://doi.org/10.33445/sds.2021.11.5.11>.

14. Boiko, V. M., Nozhenko, O. M., Merkulov, O. A., Herasymov, S. V., Kirvas, V. V., & Zubrytskyi, H. M. (2021). Doslidzhennia aspektiv normatyvno-pravovoho zabezpechennia orhanizatsii ta provedennia metrolohiichnoi ekspertyzy dokumentatsii na vyrobny ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki [Research into aspects of regulatory and legal support for the organisation and conduct of metrological examination of documentation for weapons and military equipment]. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl – Collection of scientific works of Kharkiv National University of Air Forces*, 4(70), 95–104. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.70.14>.

15. Chernikov, O. V. (2024). Vprovadzhennia novykh standartiv oformlennia konstruktorskoï dokumentatsii v navchalnyi protses ta vyrobnytstvo. [Introduction of new standards for design documentation into the educational process and production.] *Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika - Applied geometry and engineering graphics*, 1(106), 241–251. <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2024.106>.

16. GOST 3325-85. (1987). Podshypnyky kachenyia. Polia dopuskov y tekhnicheskyye trebovaniia [Rolling bearings. Tolerance fields and technical requirements]. *Izdatelstvo standartov – Publishing of standards*.

17. DSTU GOST 2.308:2013. (2015). Yedyna systema konstruktorskoï dokumentatsii. Zaznachennia dopuskiv formy ta rozmishchennia poverkhon [Unified system of design documentation. Specification of tolerances for shape and position of surfaces]. *Derzhspozhyvstandart Ukrainy – State Consumer Standards of Ukraine*.

18. GOST 2.309-73. (2007). ESKD. Oboznacheniya sherokhovatosty poverkhnosti [Surface roughness designations]. *Izdatelstvo standartov – Publishing of standards*.

19. DSTU EN ISO 1101:2018. (2018). Tekhnichni vymohy do heometrychnykh kharakterystyk produktii [Technical requirements for the geometric characteristics of products]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

20. DSTU EN ISO 1302:2018. (2018). Poznachennia zovnishnoi tekstury v tekhnichnii dokumentatsii [Designation of external texture in technical documentation]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

21. GOST 2.302-68. (2007). ESKD. Masshtaby [Scale]. *Izdatelstvo standartov – Publishing of standards*.

22. DSTU ISO 128-1:2005. (2001). Kreslenyky tekhnichni. Zahalni pryntsyipy oformlennia. Chastyna 1 [Technical drawings. General principles of design. Part 1]. *Derzhspozhyvstandart Ukrainy – State Consumer Standards of Ukraine*.

23. DSTU ISO 128-24:2018. (2018). Kreslenyky tekhnichni. Zahalni pryntsyipy podannia. Chastyna 24 [Technical drawings. General principles of presentation. Part 24]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

24. DSTU EN ISO 129-1:2022. (2022). Kreslenyky tekhnichni. Prostavlennia rozmiriv i dopuskiv. Chastyna 1 [Technical drawings. Dimensioning and tolerancing. Part 1]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

25. GOST 25670-83. (1984). Osnovnye normy vzaimozameniaemosti. Predelnye otkloneniia razmerov [Basic interchangeability standards. Maximum dimensional deviations]. *Izdatelstvo standartov – Publishing of standards*.

26. DSTU ISO 2768-1:2021. (2003). Osnovni dopusky. Chastyna 1 [Basic tolerances. Part 1]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

27. ДСТУ ISO 2768-2:2001. (2003). Osnovni dopusky. Chastyna 2 [Basic tolerances. Part 2]. *Derzhavne pidpriemstvo «Ukrainskyi naukovy-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» – State Enterprise ‘Ukrainian Scientific and Research Centre for Standardisation, Certification and Quality’*.

Дата першого надходження статті до видання: 28.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.12.2025



**Yuriy Adamenko<sup>1</sup>, Serhii Maidaniuk<sup>2</sup>, Oleksandr Plivak<sup>2</sup>,  
Serhii Lapkovsky<sup>4</sup>, Volodymyr Frolov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD 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](mailto:yuriy.adamenko@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4232-3206>. **Researcher ID:** [ACT-0127-2022](https://orcid.org/0000-0003-4232-3206)

<sup>2</sup>PhD 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](mailto:maysv3@gmail.com) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2853-8606>. **Researcher ID:** [J-7542-2017](https://orcid.org/0000-0003-2853-8606)

<sup>3</sup>Head 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](mailto:aplivak@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3680-8485>. **Researcher ID:** [J-7541-2017](https://orcid.org/0000-0003-3680-8485)

<sup>4</sup>PhD 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](mailto:Lapkovsky@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **Researcher ID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

<sup>5</sup>PhD 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](mailto:Lapkovsky@ukr.net). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **Researcher ID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

**METROLOGICAL EXPERTISE AND NORM CONTROL  
OF ENGINEERING DOCUMENTS IN SMALL  
AND MEDIUM-SIZED ENTERPRISES**

*In today's mechanical engineering, especially in small and medium-sized enterprises, the quality and cost of products are important factors that are directly influenced by the quality and consistency of the engineering and technological documentation developed, as well as its compliance with current standards and normative documents. To assess the quality of engineering documentation, a metrological examination and normative control of documentation are carried out by a specialised service of the enterprise. However, there are a number of problems with conducting these examinations: outdated and missing national standards due to their loss of validity in Ukraine; inconsistency of existing standards with international standards. In addition, there is a lack of information on the experience of implementing new standards, including the organisation of metrological examination and normative control, in production and the analysis of typical errors in engineering documentation.*

*In small and medium-sized enterprises, an additional problem with conducting metrological examinations is the limited human resources, as the examinations are carried out by the development engineers themselves, and financial resources, which affects the quality of engineering documentation. Thus, there is a need to refine the methods of organising and conducting examinations in small and medium-sized enterprises.*

*The article lists typical shortcomings faced by small and medium-sized enterprises and errors identified during the metrological examination and normative control of engineering documentation. Based on the analysis of the identified shortcomings and errors, recommendations have been formulated for standardising the organisation and improving the quality of metrological examination and normative control of engineering documentation in small and medium-sized enterprises.*

*Thus, it can be noted that taking these comments into account will allow for better organisation of the expertise and improve the quality of engineering documentation, which will improve the quality and reduce the cost of products.*

**Keywords:** metrological expertise; norm control; engineering documentation; standards; ISO; ESKD; errors; drawing; tolerances.

*Fig.: 6. References: 27.*



DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-43-54](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-43-54)

УДК 669.295.5:621.9

**Наталія Олександрівна Балицька**

кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту

Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>. Scopus ID: 57193890222**ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У СПЛАВАХ NiTi ПРИ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ**

Основою функціональної поведінки сплавів NiTi (нітинол) є обернене перетворення між аустенітною та мартенситною фазами, що забезпечує ефект пам'яті форми та надпружність. Температури й кінетика цього перетворення залежать від складу, термічної історії, умов навантаження та мікроструктурного стану матеріалу. У статті проведено огляд сучасних досліджень фазових перетворень у сплавах системи NiTi та їхнього впливу на мікроструктуру і функціональні властивості матеріалу під час лезової обробки.

**Ключові слова:** сплав NiTi; механічна обробка; фазові перетворення; ефект пам'яті форми.

Рис.: 10. Бібл.: 28.

**Актуальність теми дослідження.** Сплав NiTi (нітинол) є одним із найвідоміших та досліджуваних сплавів із пам'яттю форми, що поєднує в собі два особливі явища – ефект пам'яті форми та супереластичність. Вони зумовлені оборотними фазовими переходами між високоорганізованою аустенітною (B2) та низькотемпературною мартенситною (B19') фазами, а також наявністю проміжної R-фази. Ці властивості забезпечують нітинолу виняткову здатність відновлювати форму після деформації й працювати у змінних умовах навантаження. Завдяки цьому NiTi широко використовується у медицині (стенти, ортодонтичні дуги, імпланти), авіаційно-космічній галузі, робототехніці та мікросистемній техніці.

Водночас унікальні фізико-механічні характеристики нітинолу ускладнюють його оброблюваність. Традиційні методи різання часто супроводжуються підвищенням зношуванням інструменту, утворенням задирок, нерівномірною якістю поверхні. Головною причиною цього є тенденція NiTi до фазових перетворень безпосередньо у процесі обробки, що спричинюється як локальним нагрівом у зоні різання, так і дією значних механічних напружень. У результаті виникає складна комбінація процесів: стрес-індуковане мартенситне перетворення, зворотний перехід у аустеніт при підвищенні температури, а також стабілізація R-фази під циклічним навантаженням. Ці явища змінюють мікроструктуру приповерхневих шарів, впливають на залишкові напруження, мікротвердість, втомну довговічність і, в кінцевому підсумку, визначають експлуатаційні властивості виробу.

**Постановка проблеми.** Особливої уваги заслуговує лезова механічна обробка сплавів NiTi, яка залишається ключовим методом формоутворення деталей із нітинолів. Вона забезпечує високу точність і продуктивність обробки, але водночас може викликати фазові перетворення у матеріалі. Саме тут виникає найбільше проблем – від неконтрольованої зміни мікроструктури до деградації функціональних властивостей сплаву. Тому питання дослідження фазових перетворень, зумовлених процесом лезової обробки, є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформаційною базою для розуміння поведінки нітинолів є праці з побудови та інтерпретації бінарної діаграми NiTi [1-3]. Кристалічні модифікації сплавів системи NiTi та маршрути фазових перетворень детально описують дослідження [2; 4-9]. Роботи [10-14] досліджують зв'язок між мікроструктурою та функціональними властивостями нітинолів – ефектом пам'яті форми та надпружністю.

В оглядових роботах [15; 16] розглядаються останні дослідження в галузі обробки сплавів NiTi з метою оцінки загальних характеристик їх оброблюваності.

Блок праць, присвячених точінню сплавів NiTi [17-24], демонструє, що швидкість різання істотно впливає на глибину зміненого шару, приховану теплоту перетворення та мікротвердість приповерхневих зон. Разом із тим, існують і розбіжності в отриманих результатах. Окремі роботи прогнозують збільшення глибини ураженого шару із збільшенням швидкості різання [19], тоді як інші фіксують її зменшення через ефект термічного розм'якшення матеріалу [18; 24]. Це свідчить про необхідність більш глибоких досліджень у цьому напрямку.

Відомо про роботи, що досліджують процеси кріогенного різання, з різними стратегіями охолодження та з попереднім підігрівом заготовки [18; 24]. Доведено, що підтримання мартенситного стану нітинолу (кріогенне попереднє охолодження) знижує сили різання, зношування та шорсткість обробленої поверхні, тоді як обробка в аустенітному стані не завжди дає переваги над сухим або MQL-режимами (мінімальна кількість мастила) [25].

Щодо фрезерування, то відомі роботи, у яких виявлено стрес-індукований мартенсит і зміцнені поверхневі шари, глибина яких залежить від швидкості різання [26-28].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Узагальнюючи, сучасні дослідження підтверджують визначальну роль фазових перетворень у формуванні функціонально важливого приповерхневого шару під час лезової обробки сплавів NiTi. Водночас виявлені суперечності щодо впливу режимів різання (передусім швидкості різання) на глибину і природу зміцненого шару підкреслюють потребу в подальших глибоких багатofакторних дослідженнях.

Інформаційну основу літературного огляду, представленого в цій роботі, становлять результати зазначених вище досліджень.

**Метою статті** є узагальнення сучасних уявлень про фазові перетворення в сплавах NiTi та аналіз їхнього впливу на мікроструктуру і функціональні властивості матеріалу під час лезової обробки.

**Виклад основного матеріалу. Бінарна діаграма системи NiTi.** Бінарна діаграма стану системи нікель-титан (NiTi) є фундаментальним інструментом для розуміння фазових перетворень у нітинолі. Вона демонструє залежність фазового складу сплаву від температури та вмісту нікелю, охоплюючи діапазон від чистого титану до чистого нікелю. Найпрактичніше значення має вузька область поблизу еквіватомного складу (приблизно 49...51 ат. % Ni), де формується інтерметалічна сполука NiTi – основна фаза, що відповідає за ефект пам'яті форми та надпружність.

Жовта область на діаграмі (рис. 1), розташована біля 50 ат. % Ni, позначає зону стабільності фази NiTi з упорядкованою кубічною структурою типу B2. Саме з неї при охолодженні формується мартенситна фаза B19', що забезпечує оборотне мартенситне перетворення. Висока чутливість властивостей нітинолу до незначних відхилень у складі зумовлена тим, що навіть  $\pm 0,5$  ат. % зміни вмісту нікелю можуть істотно зсунути температури фазових переходів (початку утворення мартенситу  $M_s$ , завершення утворення мартенситу  $M_f$ , початку зворотного перетворення в аустеніт  $A_s$ , завершення зворотного аустенітного перетворення  $A_f$ ) [1, 2].

За межами області NiTi діаграма демонструє утворення вторинних фаз –  $Ti_2Ni$  при надлишку титану та  $TiNi_3$  або  $Ni_4Ti_3$  при надлишку нікелю. Ці фази не беруть участі у зворотному мартенситному перетворенні й можуть погіршувати механічні та функціональні характеристики сплаву. Водночас дрібнодисперсні виділення, такі як  $Ni_4Ti_3$ , можуть відігравати роль центрів зародження мартенситу, впливаючи на кінетику та стабільність фазових переходів.

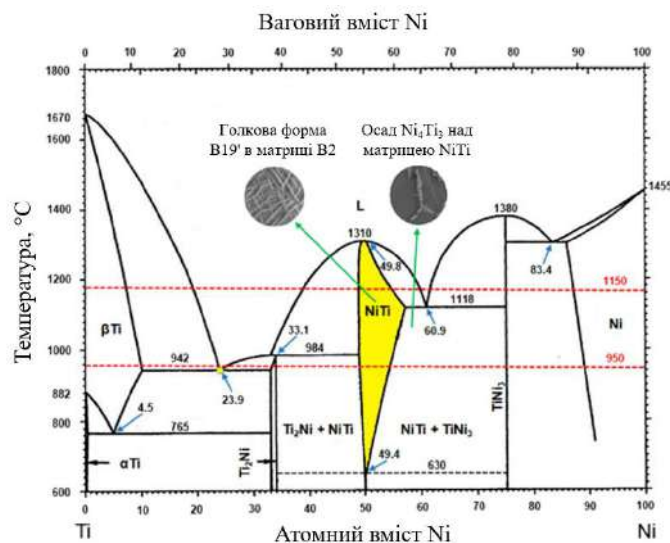


Рис. 1. Бінарна діаграма системи NiTi [1, 2]:

B2 – кубічна, високотемпературна, аустенітна фаза нітинолу, стабільна при нагріванні; B19' – моноклинна мартенситна низькотемпературна фаза, що утворюється з B2 під час охолодження, відповідальна за зворотну деформацію;  $Ti_2Ni$  – вторинна фаза, інтерметалічна сполука титану й нікелю з надлишком Ti, яка утворюється при титановмісних складах ( $< 49$  ат. % Ni);  $TiNi_3$  – вторинна фаза, інтерметалічна сполука з надлишком Ni, утворюється при нікелевмісних складах ( $> 51$  ат. % Ni);  $Ni_4Ti_3$  – дрібнодисперсна фаза нікелю й титану, випадає при старінні, впливає на температуру фазових переходів та стабільність мартенситу;  $\alpha$ -Ti – гексагональна щільноупакована фаза, стабільна при низьких температурах і високому вмісті титану;  $\beta$ -Ti – кубічна об'ємноцентрована фаза, стабільна при підвищених температурах; L – рідка фаза, область плавлення сплаву

Таким чином, бінарна діаграма NiTi відображає складну рівновагу між фазами і є ключем до керування мікроструктурою та функціональними властивостями нітинолу. Точний контроль складу та термічної історії сплаву дозволяє цілеспрямовано регулювати його температуру перетворення і досягати оптимального ефекту пам'яті форми.

Трикутна область бінарної фазової діаграми NiTi (рис. 1) представляє найбільший інтерес, оскільки тут має місце чудове поєднання властивостей ефекту пам'яті форми (ЕПФ) на основі фаз, що утворилися.

**Основні кристалічні модифікації сплаву NiTi.** На рис. 2 показано дві основні кристалічні модифікації сплаву NiTi, які відповідають за його унікальні функціональні властивості – аустенітну (B2) та мартенситну (B19') фази.

Аустенітна фаза B2 має упорядковану об'ємно-центровано-кубічну (ОЦК) структуру, аналогічну до типу CsCl. Структура B2 є симетричною та термодинамічно стабільною при високих температурах. При охолодженні вона бездифузійно перетворюється в мартенситну фазу B19'.

Мартенситна фаза B19' має моноклинну кристалічну ґратку. У цій структурі атоми нікелю (Ni) та титану (Ti) розміщені нерівномірно, а комірка спотворена відносно кубічної симетрії. Саме така анізотропна будова забезпечує можливість двійникування та зсувів атомних площин без руйнування зв'язків. Завдяки цьому мартенсит може зазнавати значних оборотних деформацій, що лежить в основі ефекту пам'яті форми.

Перехід між цими двома структурами є оборотним мартенситним перетворенням, яке визначає як ефект пам'яті форми, так і супереластичну поведінку нітинолу. Завдяки цьому матеріал здатний змінювати форму при охолодженні чи механічному навантаженні та відновлювати її при нагріванні, без втрати структурної цілісності.

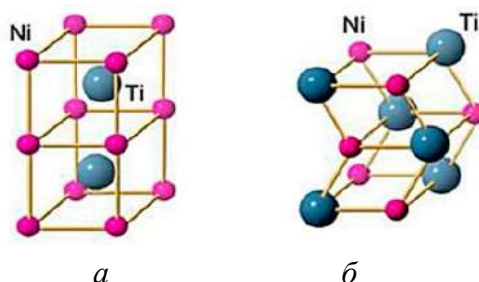


Рис. 2. Основні кристалічні модифікації сплаву NiTi [13]:  
а – аустенітна фаза B2; б – мартенситна фаза B19'

**Механізми надпружності та ефекту пам'яті форми у сплавах TiNi.** На рис. 3 представлено узагальнену схему, що демонструє зв'язок між температурою, напруженням і деформацією під час прояву надпружності та ефекту пам'яті форми у сплаві NiTi.

Залежність між температурою і напруженням пояснює поведінку матеріалу при супереластичності (надпружності). При температурах, вищих за  $A_f$  (температуру завершення зворотного фазового перетворення), сплав перебуває в аустенітному стані. Під дією зовнішнього навантаження аустеніт трансформується в стрес-індукований мартенсит – відбувається фазове перетворення, що супроводжується характерною плато-деформацією. Після зняття навантаження мартенсит знову переходить в аустеніт, і сплав відновлює початкову форму. Таким чином виникає велика оборотна деформація (до 6-8 %), без необхідності нагрівання, що є проявом надпружності.

При охолодженні аустеніт (B2) переходить у двійникований мартенсит (B19'). Під дією механічного навантаження двійники руйнуються, і структура переходить у роздвійникований мартенсит, що супроводжується деформацією. При подальшому нагріванні матеріал проходить зворотне мартенситне перетворення (B19'-B2), внаслідок чого відбувається повне відновлення первісної форми. Це є демонстрацією класичного механізму ефекту пам'яті форми.

Таким чином, надпружність – це оборотна деформація при навантаженні вище температури  $A_f$ , а ефект пам'яті форми – це оборотна деформація при нагріванні після пластичної деформації в мартенситному стані. Ці явища мають спільну природу – оборотне мартенситне перетворення між фазами B2 і B19', що забезпечує нітінолу унікальні функціональні властивості, відсутні у більшості металевих матеріалів.

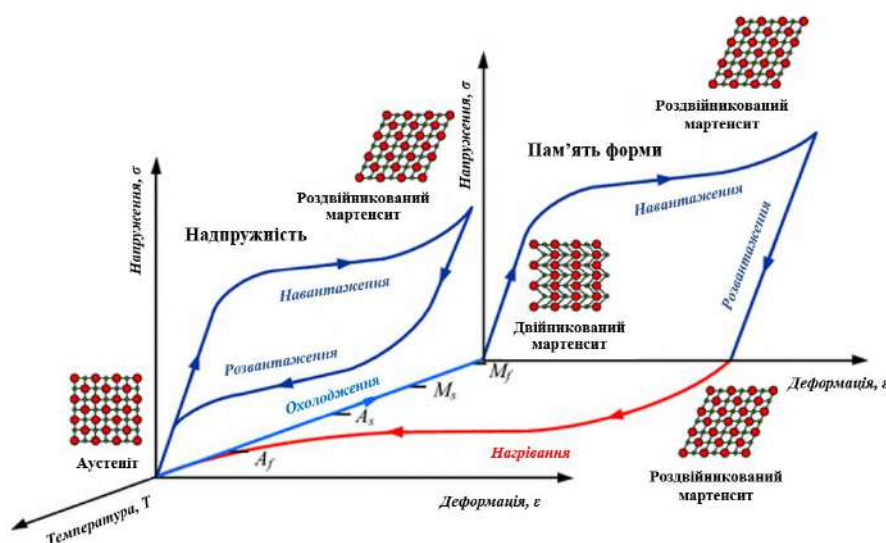


Рис. 3. Механізми надпружності та ефекту пам'яті форми в сплавах NiTi [10; 13]

**Шляхи фазових перетворень у сплавах на основі TiNi.** Залежно від хімічного складу і термомеханічної обробки, фаза B2 може пройти один із трьох шляхів перетворення, показаних на рис. 4. Перетворення B2–B19' відбувається в загартованих сплавах Ti–Ni; перетворення B2–R–B19' відбувається у сплавах TiNi після старіння (з осадженням  $Ti_3Ni_4$ ) або холоднодеформованих сплавах TiNi, а також у потрійних сплавах Ti–Ni–Fe(Al); перетворення B2–B19–B19' відбувається у сплавах Ti–Ni–Cu [8]. Кінцевим продуктом усіх мартенситних перетворень у сплавах на основі TiNi є мартенсит B19'.

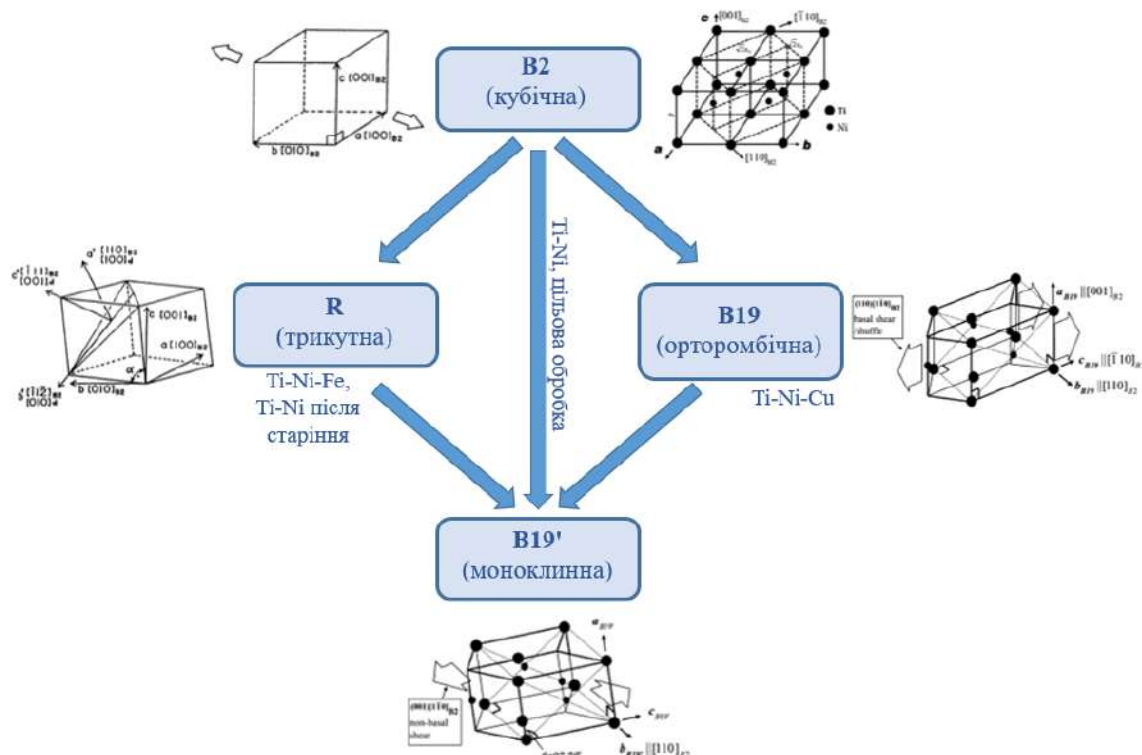


Рис. 4. Шляхи фазових перетворень у сплавах на основі TiNi [2; 4; 5]

**Мікроструктура сплавів TiNi в різних фазових станах.** На рис. 5 наведено мікроструктури сплавів NiTi в різних фазових станах. Мікроструктура аустеніту (B2) характеризується рівномірним зернистим виглядом із чітко вираженими межами зерен (рис. 5, а). Цей стан відповідає стабільній високотемпературній фазі, в якій атоми нікелю та титану впорядковані у кубічній об'ємноцентрованій структурі типу CsCl.

R-фаза сплаву  $Ti_{50.3}Ni_{48.2}Fe_{1.5}$  є проміжною структурою між аустенітом і мартенситом (рис. 5, б). Вона має типову морфологію типу «ялинка» у вигляді дрібних смугастих утворень (область R), що зароджуються всередині матриці B2 (P). Ця фаза знижує енергетичний бар'єр мартенситного перетворення й впливає на температури  $A_s$  та  $A_f$ .

Трикутна морфологія мартенситу B19 сплаву  $Ti_{49.5}Ni_{40.5}Cu_{10}$  показана на оптичній мікрофотографії (рис. 5, в).

Типова морфологія мартенситів B19' представлена на рис. 5, г, д. Характерна риса – паралельні пластинчасті смуги, які відображають наявність двійників у структурі. У зразках, де мартенсит утворюється при охолодженні без зовнішнього навантаження, двійники формуються для мінімізації пружних напружень. Просвічувальна електронна мікроскопія дозволила виявити трикутну морфологію мартенситів B19' (рис. 5, г), а також дозволила спостерігати «первинні» мартенсити (більші) та «вторинні» (менші) мартенситні кластери у відпаленому та загартованому сплаві TiNi (рис. 5, е). На зображенні (рис. 5, д) спостеріга-



ються дрібнодисперсні виділення фази  $\text{Ni}_4\text{Ti}_3$ , що утворюються під час старіння при температурах 400...500 °С. Ці частинки впорядковують навколишню матрицю, впливають на нуклеацію мартенситу та суттєво змінюють температури фазових перетворень.

Отже, така мікроструктурна мінливість є основою функціональних властивостей  $\text{NiTi}$ , зокрема його здатності до зворотних фазових перетворень, пам'яті форми та супереластичності. Водночас саме чутливість нітинолу до термомеханічних впливів зумовлює складність його оброблення традиційними методами різання.

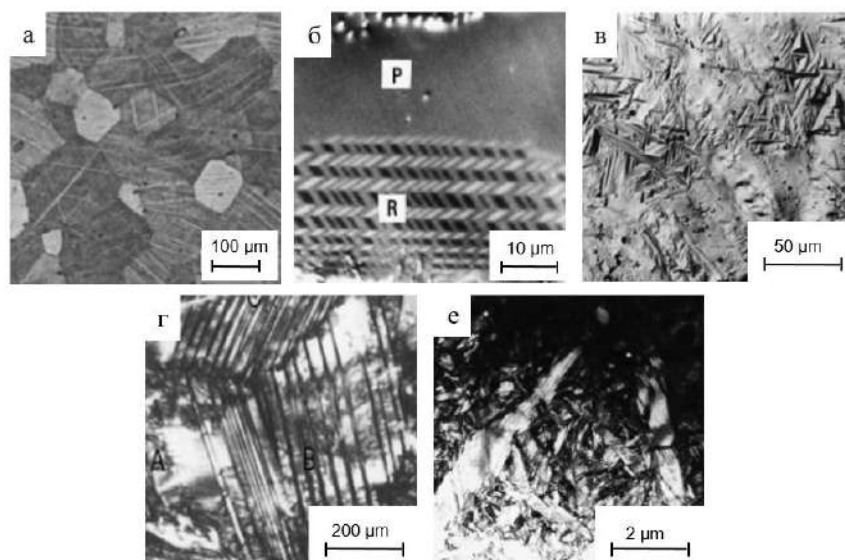


Рис. 5. Мікроструктура сплавів  $\text{TiNi}$  в різних фазових станах:  
а – фаза B2 [14]; б – R-фаза [9; 2]; в – фаза B19 [7; 2]; г, д – фаза B19' [6; 2]

**Фазові перетворення в сплавах  $\text{NiTi}$  при обробці різанням.** Під час лезової обробки (точіння, фрезерування, свердління та ін.) у зоні різання виникають локальні високі температури, значні градієнти напружень і швидкі деформації, які здатні ініціювати або навіть повністю змінити фазовий стан матеріалу. У результаті у приповерхневих шарах можуть відбуватись стрес-індуковані мартенситні перетворення, утворення R-фази, а також часткове зворотне перетворення мартенситу в аустеніт через теплове нагрівання. Такі процеси безпосередньо впливають на мікроструктуру, залишкові напруження, твердість і функціональні властивості готової деталі.

У роботі [17] були проведені експерименти з точіння аустенітного  $\text{NiTi}$  (Ni 50,8 %, ат.) на різних швидкостях різання та дослідження змін мікроструктури обробленої поверхні (рис. 6). Автори [17] приходять до висновку, що при низькій швидкості різання (15 м/хв) мікроструктурні зміни викликані передусім механічними впливами. Тоді як при високій швидкості різання (125 м/хв) переважає тепловий вплив.

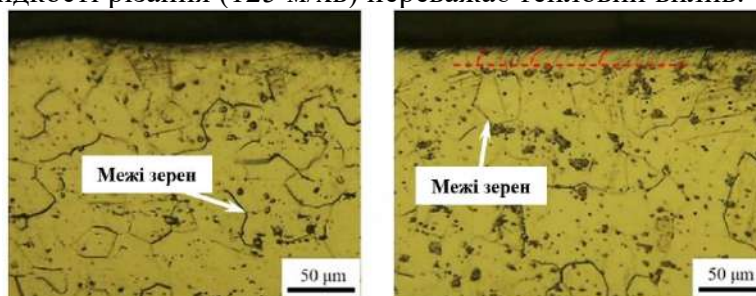


Рис. 6. Мікроструктура поверхні після точіння (поперечний переріз) [17]:  
а – швидкість різання 15 м/хв; б – швидкість різання 125 м/хв;  
(подача 0,15 мм/об, глибина різання 0,2 мм)

З даних, наведених на рис. 7–8, видно, що механічна обробка впливає на результати диференціальної скануючої калориметрії (ДСК). Прихована теплота фазового перетворення після механічної обробки менша, ніж у вихідному зразку. Автори пояснюють це тим, що дислокації в оброблених зразках гальмують фазове перетворення, що призводить до меншої енергії для фазового перетворення. Оскільки падіння прихованої теплоти при 15 м/хв є більш значним, ніж при 125 м/хв, то при низькій швидкості різання в оброблених зразках спостерігається вища щільність дислокацій [17].

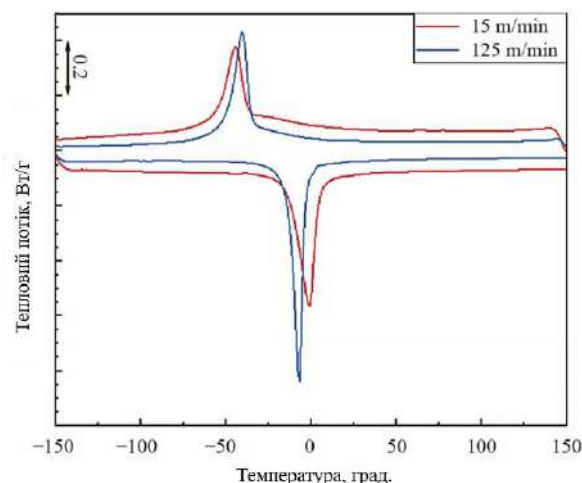


Рис. 7. ДСК-криві оброблених зразків зі сплаву NiTi [17]

Водночас зміна температур фазових переходів до та після механічної обробки (рис. 8) не перевищувала 10 °С. При швидкості 125 м/хв температура фазового переходу залишається майже незмінною. Гістерезис фазового переходу має місце при швидкості 15 м/хв, що, на думку авторів [17], свідчить про збільшення опору фазовому переходу та певною мірою впливає на ефект пам'яті форми.

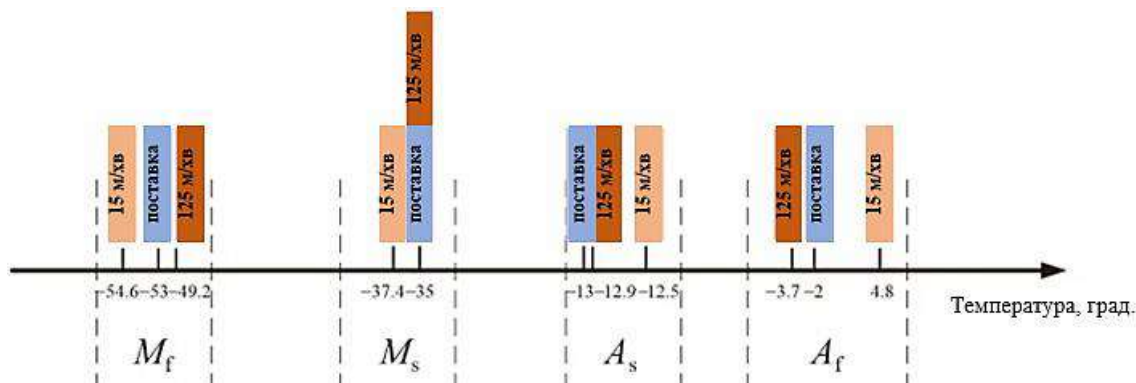


Рис. 8. Температури фазових переходів зразків зі сплаву NiTi у стані поставки та після точіння [17]

До подібних висновків прийшли також автори дослідження [18], яке присвячене впливу різних швидкостей і умов точіння (сухе, криогенне в середовищі CO<sub>2</sub>, охолодження рідиною та з високим тиском) на якість поверхні аустенітного NiTi (55,82 % Ni, Ti – решта, мас.%). Вони виявили, що глибина ураженого шару зменшується зі збільшенням швидкості різання для всіх умов, крім криогенної обробки, через ефект анігіляції при підвищеній температурі (рис. 9).

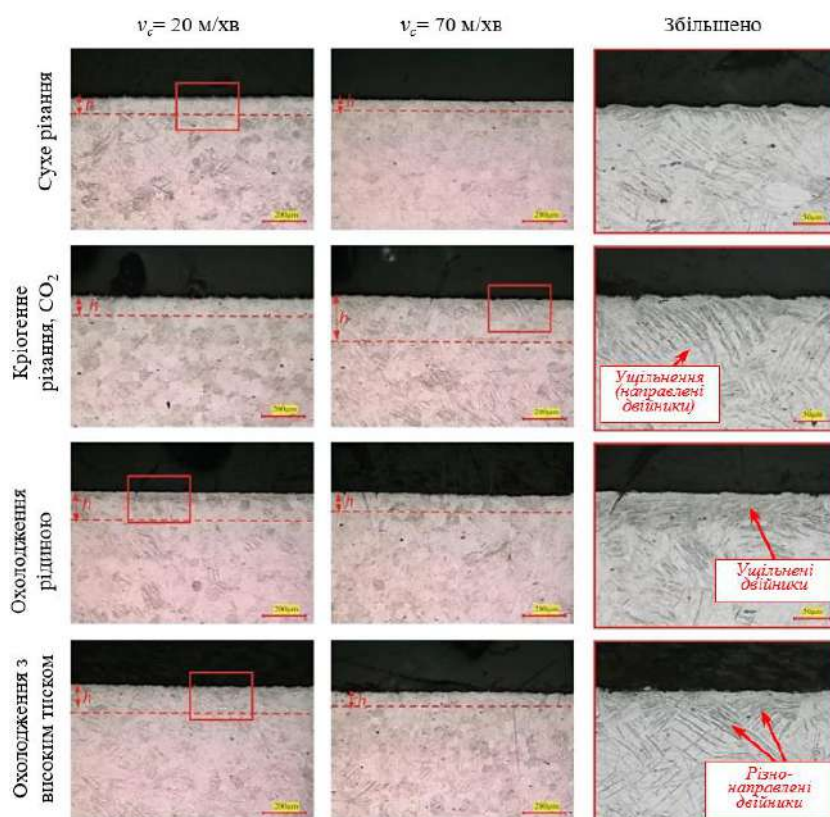


Рис. 9. Мікроструктура поверхні після точіння (поперечний переріз) [18]

Подібні явища мають місце й під час фрезерування сплавів NiTi. Металографічний аналіз із застосуванням методу диференціального інтерференційного контрасту (DIC) [26] дозволив спостерігати стрес індукований мартенсит на поверхні сплаву Ni<sub>56.5</sub>Ti<sub>43.5</sub> після сухого торцевого фрезерування (рис. 10). Були виявлені неоднорідний поверхневий шар, багатий на мартенсит (глибиною до 110 мкм), та глибший неоднорідний підповерхневий шар, що містив окремі глибокі мартенситні голки (глибиною до 205 мкм). Це пояснюється тим, що поверхневий шар утворюється під одночасним впливом механічних і термічних ефектів процесу різання, тоді як підповерхневий шар утворюється переважно під впливом механічних ефектів. Зі збільшенням швидкості різання з 20 до 50 м/хв загальна глибина ураженого шару зменшилася на 42,5 %.

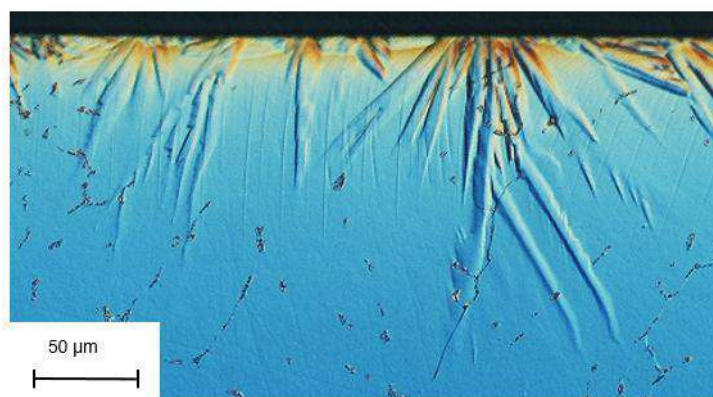


Рис. 10. Мікроструктура поверхні сплаву NiTi після сухого торцевого фрезерування (поперечний переріз, швидкість різання 20 м/хв, подача 0,05 мм/зуб, глибина різання 0,5 мм)



Зважаючи на те, що ефект пам'яті форми та надпружність NiTi залежать від стабільності фазового складу, контроль фазових перетворень під час механічної обробки є важливим для забезпечення надійності та довговічності виробів. Тому актуальним напрямом сучасних досліджень є аналіз впливу параметрів різання (швидкості, подачі, глибини, стану інструмента) на характер фазових перетворень у нітинолі, зокрема на частку мартенситу, розмір зерен і стан двійникових структур у приповерхневій зоні. Технологічний процес виготовлення виробів зі сплавів NiTi повинен бути розроблений таким чином, щоб мінімізувати глибину механічно індукованого поверхневого шару, оскільки він може вплинути на функціональні властивості кінцевого продукту.

Таким чином, дослідження фазових перетворень, спричинених термомеханічними процесами під час лезової обробки сплавів NiTi, є необхідною умовою для розроблення оптимальних режимів механічного різання, які забезпечать збереження функціональних властивостей матеріалу без їх деградації.

**Висновки.** На основі аналізу останніх наукових досліджень фазових перетворень при обробці різанням сплавів NiTi встановлено, що фазові перетворення можуть бути викликані термомеханічними процесами під час лезової обробки. У зоні різання виникають екстремальні термомеханічні умови, які здатні ініціювати стрес-індуковані мартенситні перетворення, утворення R-фази та часткове зворотне перетворення мартенситу в аустеніт. Ці процеси формують неоднорідний приповерхневий шар, що істотно відрізняється від об'єму за фазовим складом і властивостями.

Літературні дані свідчать про залежність глибини індукованого шару від швидкості різання та умов охолодження. На низьких швидкостях переважають механічні ефекти, що зумовлюють пластичні деформації і мартенситне перетворення, а на високих — термічні, які зумовлюють часткове відновлення аустеніту.

Проведений огляд демонструє, що подальші дослідження мають бути спрямовані на комплексне вивчення фазових перетворень, індукованих термомеханічними процесами під час лезової обробки, із використанням сучасних методів структурного аналізу (DIC, EBSD, TEM, DSC) та моделювання температурно напруженого стану зони різання. Це дозволить оптимізувати режими обробки й забезпечити стабільність ефекту пам'яті форми та надпружності в готових виробах з NiTi.

#### Список використаних джерел

1. Patel, S.K., & Behera, A. (2022). Evolution of phases and their influence on shape memory effect by varying sintering parameters of NiTi alloys. *Metals and Materials International*, 28(11), 2691–2705. <https://doi.org/10.1007/S12540-021-01166-5>.
2. Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 50, 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (Eds.). (1990). Binary Alloy Phase Diagrams (2nd ed., Vol. 3, p. 2874). *Materials Park, OH: ASM International*.
4. Barsch, G.R. (1999). *Materials Science Forum*, 327–328, 367.
5. Ren, X., & Otsuka, K. (1998). *Scripta Materialia*, 38, 1669.
6. Madangopal, K. (1997). *Acta Materialia*, 45, 5347.
7. Saburi, T., Watanabe, Y., & Nenno, S. (1989). *ISIJ International*, 29, 405.
8. Nam, T.H., Saburi, T., & Shimizu, K. (1990). *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 31, 959.
9. Fukuda, T., Saburi, T., Doi, K., & Nenno, S. (1992). *Materials Transactions JIM*, 33, 271.
10. Lagoudas, D.C. (2008). *Shape Memory Alloys*. New York: Springer Science & Business Media.
11. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>.

12. Sun, L., & Huang, W.M. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(11), 573–578. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9213-x>.
13. Chekotu, J.C., Groarke, R., O'Toole, K., & Brabazon, D. (2019). Advances in selective laser melting of nitinol shape memory alloy part production. *Materials*, 12(5), 809. <https://doi.org/10.3390/MA12050809>.
14. Kaynak, Y., Robertson, S.W., Karaca, H.E., & Jawahir, I.S. (2015). Progressive tool wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: influence of cooling/lubricating and heat-treatment conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.015>.
15. Kaya, E., & Kaya, İ. (2019). A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post-process perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(7), 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
16. Noor, N.Z.M., Zailani, Z.A., Hamidon, R., & Shuaib, N.A. (2021). Machinability of nickel titanium shape memory alloys: a review. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 425–440. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7_37).
17. Zhao, Y.Z., Guo, K., Sivalingam, V., et al. (2021). Surface integrity evolution of machined NiTi shape memory alloys after turning process. *Advanced Manufacturing*, 9, 446–456. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00330-1>.
18. Kitay, O., & Kaynak, Y. (2021). The effect of flood, high-pressure cooling, and CO<sub>2</sub>-assisted cryogenic machining on microhardness and microstructure of NiTi shape memory alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5799–5810. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05854-6>.
19. Kaynak, Y., Manchiraju, S., Jawahir, I.S., & Biermann, D. (2020). Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation. *CIRP Annals*, 69(1), 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
20. Shizuka, H., Sakai, K., Yang, H., Sonoda, K., Nagare, T., Kurebayashi, Y., & Hayakawa, K. (2020). Difficult cutting property of NiTi alloy and its mechanism. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 124. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
21. Zhao, Y.Z., & Sun, J. (2023). Study on the characteristics of phase in turning NiTi shape memory alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 98, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.009>.
22. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H., Kurebayashi, Y., Hayakawa, K., & Nagare, T. (2021). Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of superelastic NiTi alloy. *International Journal of Automation Technology*, 15(1), 24–33. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.
23. Zhao, Y., Li, J., Guo, K., Sivalingam, V., & Sun, J. (2020). Study on chip formation characteristics in turning NiTi shape memory alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.072>.
24. Kaynak, Y., Karaca, H., & Jawahir, I. (2015). Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>.
25. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., et al. (2015). The effect of active phase of the work material on machining performance of a NiTi shape memory alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2625–2636. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2828-1>.
26. Balytska, N., Penter, L., Manokhin, A. et al. (2025) Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141, 3181–3198. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16777-0>.
27. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A., & Ozkan, D. (2020). Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 10(12), 1259. <https://doi.org/10.3390/coatings10121259>.
28. Altas, E., Altin Karatas, M., & Gokkaya, H. (2021). Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat-treated cutting tools under different cutting conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(12), 9426–9439. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06095-3>.

## References

1. Patel, S.K., & Behera, A. (2022). Evolution of phases and their influence on shape memory effect by varying sintering parameters of NiTi alloys. *Metals and Materials International*, 28(11), 2691–2705. <https://doi.org/10.1007/S12540-021-01166-5>.
2. Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 50, 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (Eds.). (1990). Binary Alloy Phase Diagrams (2nd ed., Vol. 3, p. 2874). *Materials Park, OH: ASM International*.
4. Barsch, G.R. (1999). *Materials Science Forum*, 327–328, 367.
5. Ren, X., & Otsuka, K. (1998). *Scripta Materialia*, 38, 1669.
6. Madangopal, K. (1997). *Acta Materialia*, 45, 5347.
7. Saburi, T., Watanabe, Y., & Nenno, S. (1989). *ISIJ International*, 29, 405.
8. Nam, T.H., Saburi, T., & Shimizu, K. (1990). *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 31, 959.
9. Fukuda, T., Saburi, T., Doi, K., & Nenno, S. (1992). *Materials Transactions JIM*, 33, 271.
10. Lagoudas, D.C. (2008). *Shape Memory Alloys*. New York: Springer Science & Business Media.
11. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>.
12. Sun, L., & Huang, W.M. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(11), 573–578. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9213-x>.
13. Chekotu, J.C., Groarke, R., O'Toole, K., & Brabazon, D. (2019). Advances in selective laser melting of nitinol shape memory alloy part production. *Materials*, 12(5), 809. <https://doi.org/10.3390/MA12050809>.
14. Kaynak, Y., Robertson, S.W., Karaca, H.E., & Jawahir, I.S. (2015). Progressive tool wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: influence of cooling/lubricating and heat-treatment conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.015>.
15. Kaya, E., & Kaya, İ. (2019). A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post-process perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(7), 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
16. Noor, N.Z.M., Zailani, Z.A., Hamidon, R., & Shuaib, N.A. (2021). Machinability of nickel titanium shape memory alloys: a review. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 425–440. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7_37).
17. Zhao, Y.Z., Guo, K., Sivalingam, V., et al. (2021). Surface integrity evolution of machined NiTi shape memory alloys after turning process. *Advanced Manufacturing*, 9, 446–456. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00330-1>.
18. Kitay, O., & Kaynak, Y. (2021). The effect of flood, high-pressure cooling, and CO<sub>2</sub>-assisted cryogenic machining on microhardness and microstructure of NiTi shape memory alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5799–5810. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05854-6>.
19. Kaynak, Y., Manchiraju, S., Jawahir, I.S., & Biermann, D. (2020). Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation. *CIRP Annals*, 69(1), 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
20. Shizuka, H., Sakai, K., Yang, H., Sonoda, K., Nagare, T., Kurebayashi, Y., & Hayakawa, K. (2020). Difficult cutting property of NiTi alloy and its mechanism. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 124. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
21. Zhao, Y.Z., & Sun, J. (2023). Study on the characteristics of phase in turning NiTi shape memory alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 98, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.009>.
22. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H., Kurebayashi, Y., Hayakawa, K., & Nagare, T. (2021). Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of superelastic NiTi alloy. *International Journal of Automation Technology*, 15(1), 24–33. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.

23. Zhao, Y., Li, J., Guo, K., Sivalingam, V., & Sun, J. (2020). Study on chip formation characteristics in turning NiTi shape memory alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.072>.
24. Kaynak, Y., Karaca, H., & Jawahir, I. (2015). Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>.
25. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., et al. (2015). The effect of active phase of the work material on machining performance of a NiTi shape memory alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2625–2636. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2828-1>.
26. Balytska, N., Penter, L., Manokhin, A. et al. (2025) Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141, 3181–3198. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16777-0>.
27. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A., & Ozkan, D. (2020). Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 10(12), 1259. <https://doi.org/10.3390/coatings10121259>.
28. Altas, E., Altin Karatas, M., & Gokkaya, H. (2021). Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat-treated cutting tools under different cutting conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(12), 9426–9439. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06095-3>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.12.2025

UDC 669.295.5:621.9

### Nataliia Balytska

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Automotive Transport  
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

E-mail: [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>. Scopus ID: 57193890222

## PHASE TRANSFORMATIONS IN NITI ALLOYS DURING CUTTING PROCESSES

Nickel-titanium (NiTi) alloys, commonly known as nitinol, occupy a special place among shape memory materials due to their unique combination of high strength, corrosion resistance, biocompatibility, and the ability to undergo reversible phase transformations. These properties make nitinol widely used in medical engineering (stents, orthodontic wires, implants), as well as in aerospace, energy, and robotics industries. The functional behaviour of nitinol is based on the reversible martensitic transformation between the austenitic B2 phase and the martensitic B19' phase, which provides both the shape memory effect and superelasticity. The temperatures and kinetics of this transformation depend on the alloy composition, thermal history, loading conditions, and microstructural state of the material. This article presents a review of current research on phase transformations in nickel-titanium (NiTi) alloys and their influence on the microstructure and functional properties of the material during cutting processes. The binary NiTi phase diagram, the main crystalline modifications (B2, B19', and R phases), and the mechanisms of superelasticity and shape memory effect are discussed. Experimental data on the influence of turning and milling parameters on the phase state and structural changes in the near-surface layers of NiTi alloys are summarized. The complex thermomechanical conditions in the cutting zone that can initiate stress-induced martensitic transformations, R-phase formation, and partial reverse transformation of martensite into austenite are described. Promising directions for further research are identified, focusing on a comprehensive analysis of phase transformations occurring in the work material during cutting and the development of machining regimes that ensure the preservation of the functional properties of nitinol.

**Keywords:** NiTi alloy; machining; phase transformations; cutting speed; shape memory effect.

Fig.: 10. References: 28.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-55-62](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-55-62)

УДК 621.7

**Андрій Іванович Гречка<sup>1</sup>, Олександр Леонідович Пузирьов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>кандидат технічних наук, завідувач кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки  
Центральноукраїнського національного технічного університету (Кропивницький, Україна)E-mail: [angre17@ukr.net](mailto:angre17@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412><sup>2</sup>кандидат технічних наук, завідувач кафедри прикладної механіки  
Економіко-технологічний інститут імені Роберта Ельворті (Кропивницький, Україна)E-mail: [alpu@i.ua](mailto:alpu@i.ua), ORCID: ID <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

## ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

У статті представлено інноваційну технологію механічної обробки деталей, спрямовану на підвищення ефективності виробництва та раціональне використання інструментальних ресурсів. Проведено порівняльний аналіз традиційної і вдосконаленої схеми токарної обробки деталей із сірого чавуну. У процесі однієї операції застосовуються дві державки різних типів, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження та підвищення стабільності різання. Запропоновано використання державки типу «TCBNL 2525 M12», що дозволяє знизити динамічні навантаження й продовжити ресурс ріжучих пластин. Визначено економічну доцільність і технологічну ефективність запропонованої технології, яка забезпечує комплексний технічний, організаційний та економічний ефект.

**Ключові слова:** інноваційна технологія; механічна обробка; ріжучий інструмент; державка; ефективність виробництва; економічна доцільність.

Рис.: 6. Бібл.: 11.

**Актуальність теми дослідження.** Розвиток машинобудівної галузі України на сучасному етапі вимагає від підприємств впровадження високоефективних та інноваційних технологій механічної обробки, що будуть спрямовані на зниження рівня собівартості продукції та підвищення рівня надійності та точності технологічних процесів. Особливого значення, в умовах жорсткої ринкової конкуренції, набуває оптимізація технологічних процесів токарної обробки, що є основною операцією виготовлення більшості деталей машин. Складність форм заготовок, висока інтенсивність процесу різання, властивості сировини та матеріалів, зокрема чавуну, зумовлюють необхідність ефективного та раціонального використання металоріжучого інструменту. Тому доцільним є впровадження раціональних інноваційних технологій токарної обробки, які своєю чергою будуть забезпечувати підвищення рівня ефективності виробництва та тривалості використання ріжучого інструменту.

**Постановка проблеми.** Попри чисельні досягнення у сфері оптимізації та вдосконалення інструментальних систем, у процесі токарної обробки залишаються недостатньо вирішеними питання, що пов'язані з нерівномірним розподілом навантажень саме на ріжучі елементи, нестабільністю процесу різання та підвищеними динамічними коливаннями тощо. Це, у свою чергу, призводить до втрати точності обробки, передчасного зношування пластин та зниження рівня продуктивності обладнання. Так, зокрема, при обробці деталей із сірого чавуну складної конфігурації спостерігається інтенсивне навантаження на окремі грані пластин, що значно обмежує їхній ресурс. Тому виникає необхідність знайти оптимальні технологічні рішення, що дозволять зменшити вібрації, рівномірно розподілити навантаження та забезпечити стабільність процесу обробки деталей.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми, що пов'язані з вдосконаленням інструментального оснащення та підвищенням ефективності токарної обробки широко відображені у працях Ю. М. Кузнєцова [1], В. В. Солохи [2], Ю. Є. Паливоди [3], Б. М. Гевка [4], Б. Д. Буца, Ю. В. Ткачова [5; 6] тощо. Видатні науковці та дослідники [7–11] розглядали різні методики оптимізації режимів різання, займалися моделюванням процесів механічної обробки деталей та приділяли увагу питанням підвищення довговічності ріжучого інструменту.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз наукової літератури [1–11] показав, що більшість досліджень зосереджується тільки на загальних аспектах вибору необхідних параметрів різання. Питання застосування саме комбінованого використання державок різних типів у межах однієї токарної операції та оцінка їхнього впливу на стабільність процесу обробки й ресурс використання інструменту залишається недостатньо вивченими.

**Метою статті** є обґрунтування ефективності застосування інноваційної технології токарної обробки деталей із сірого чавуну, у якій реалізовано раціональні підходи до використання інструментального оснащення. Для досягнення зазначеної мети передбачено проведення порівняльного аналізу традиційної та запропонованої вдосконаленої технологічних схем, а також визначення економічної доцільності впровадження у виробничу практику розробленої технології.

**Виклад основного матеріалу.** У процесі аналізу діючої технології було виявлено, що технологічний процес токарної обробки відзначався нестабільністю параметрів різання та нераціональним використанням ріжучого інструменту. Запропоноване технічне рішення, що передбачає комбіноване застосування двох типів державок, забезпечило стабілізацію процесу різання, зменшення зношування пластин і підвищення точності оброблених поверхонь.

Заготовки виготовляються методом лиття із сірого чавуну, тому на їхніх поверхнях зазвичай спостерігаються залишки ливарної форми, нерівності та поверхневі напливи. Форма заготовки прямокутна, а її габарити є досить великими (рис. 1), що є нетиповим для токарної обробки. Саме через це, під час процесу точіння торцевої поверхні заготовки, відбуваються багаторазові удари ріжучої частини інструменту об матеріал, що збільшує ризик поломки і зменшує ресурс його використання.

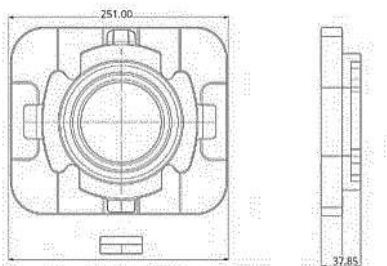


Рис. 1. Габаритні розміри заготовки

Джерело: розроблено авторами.

Зазначмо, що у процесі чорнової обробки цієї деталі використовуються змінні твердосплавні пластини типу «CNMG» (рис. 2). Саме вони призначені для зняття значних припусків при обробці поверхонь чавуну і зазвичай працюють у важких умовах навантаження. Основні схеми чорнової обробки передбачають обточування зовнішніх поверхонь, торців і внутрішніх отворів (рис. 3), що вимагає високої стійкості ріжучого інструменту.

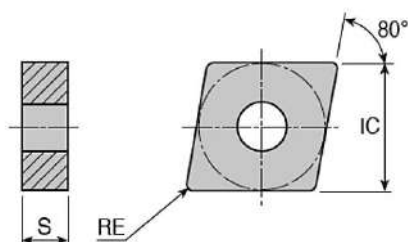


Рис. 2. Змінна твердосплавна пластина типу «CNMG»

Джерело: розроблено авторами.

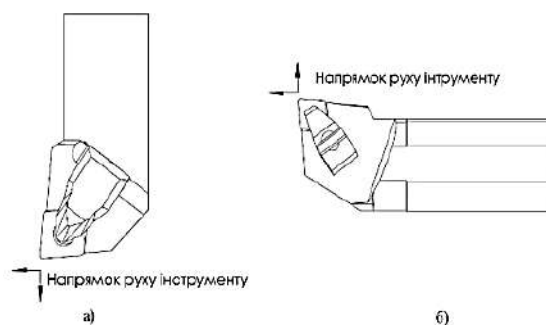


Рис. 3. Схеми обробки:

а – обробка торців і зовнішніх поверхонь; б – обробка отворів

Джерело: розроблено авторами.

Особливістю верстата, що використовується в цій технологічній операції є те, що обробка прямокутної торцевої поверхні, що має велику площу, здійснюється саме розточним різцем (рис. 4). При цьому виникають значні коливання навантажень, що, у свою чергу, знижують стабільність процесу обробки й можуть призвести до пошкодження ріжучої частини інструменту. У попередній класичній схемі при цьому в ріжучій пластині задіяними є лише дві грані 1 і 2, у той час коли грані 3 і 4 залишаються невикористаними (рис. 5). Таким чином, можна зазначити, що повний потенціал інструменту не реалізується.

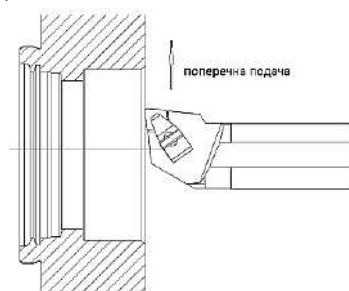


Рис. 4. Діюча схема обробки

Джерело: розроблено авторами.

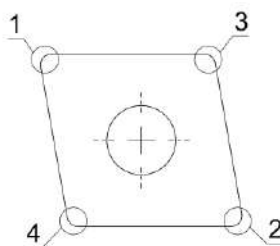


Рис. 5. Використання ресурсу ріжучої пластини

Джерело: розроблено авторами.

Для вирішення виявленої проблеми нами запропоновано використання державки «TCBNL 2525M12» (рис. 6). Її конструкція саме забезпечує зміну положення ріжучої пластини під кутом  $75^\circ$ , що своєю чергою дозволяє під час обробки задіяти всі грані інструменту. Саме завдяки цьому покращується якість обробленої поверхні, зменшуються вібраційні навантаження, підвищується точність геометричних параметрів деталей та збільшується стійкість ріжучої частини інструменту. Крім того, запропонована державка за нестабільних умов забезпечує плавніше різання, характерне для прямокутних поверхонь із литва. Також необхідно зазначити, що в результаті використання запропонованого інноваційного рішення вдалося оптимізувати процес різання без суттєвих змін у технологічному маршруті виробництва.



Рис. 6. Застосування державки «TCBNL 2525 M12»

Джерело: розроблено авторами.

Для підтвердження ефективності запропонованої інноваційної технології проведено порівняльний аналіз витрат інструменту за чотири місяці (червень – вересень): два місяці до впровадження і два після. Узагальнені результати дослідження представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльні техніко-економічні показники токарної обробки до та після удосконалення технології

| Місяць                    | Вартість інструменту, грн | Кількість використаного інструменту, од. | Кількість оброблених деталей, од. |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|
| Червень 2025 р.           | 14 000                    | 28                                       | 670                               |
| Липень 2025 р.            | 14 000                    | 30                                       | 610                               |
| Всього до впровадження    | 28 000                    | 58                                       | 1 280                             |
| Серпень 2025 р.           | 2000                      | 4                                        | 160                               |
| Вересень 2025 р.          | 2500                      | 5                                        | 180                               |
| Всього після впровадження | 4500                      | 9                                        | 340                               |

Джерело: розроблено авторами.

Кількість виготовлених деталей однією ріжучою пластиною:

$$N_{д.пл.} = N_{д.} / N_{ін} \quad (1)$$

де  $N_{д.}$  – загальна кількість оброблених деталей за період, од.;

$N_{ін}$  – кількість використаного інструменту за звітний період, од.

До впровадження технології:

$$N_{д.}^{до} = 1280 \text{ од.}; N_{ін}^{до} = 58 \text{ од.}$$

$$N_{д.пл.}^{до} = 1280 / 58 \approx 22,07 \text{ од. (на одну пластину).}$$

Після впровадження технології:

$$N_{д.}^{після} = 340 \text{ од.}; N_{ін}^{після} = 9 \text{ од.}$$

$$N_{д.пл.}^{після} = 340 / 9 \approx 37,78 \text{ од. (на одну пластину).}$$

Визначення відсоткового збільшення використання ресурсу ріжучої пластини:

$$N_{в.ін} = \frac{(N_{д.пл.}^{після} - N_{д.пл.}^{до})}{N_{д.пл.}^{після}} \cdot 100\% \quad (2)$$



$$N_{\text{в.ін}} = \frac{(37,7777... - 22,06897...)}{37,7777...} \cdot 100\% \approx 41,59\%.$$

Ресурс однієї ріжучої пластини зріс на 41,59 % відносно показників, отриманих до впровадження вдосконаленої технології.

Витрати на ріжучий інструмент для виготовлення однієї деталі:

$$K_{\text{ін.дет.}} = K_{\text{ін}} / N_{\text{д}} \quad (3)$$

де  $K_{\text{ін}}$  – вартість ріжучого інструменту за звітний період, грн;

До впровадження технології:

$$K_{\text{ін}}^{\text{до}} = 28000 \text{ грн}; N_{\text{д}}^{\text{до}} = 1280 \text{ од.}$$

$$K_{\text{ін.дет.}}^{\text{до}} = 28000 / 1280 = 21,875 \text{ грн / од.} \approx 21,88 \text{ грн / од.}$$

Після впровадження технології:

$$K_{\text{ін}}^{\text{після}} = 4500 \text{ грн}; N_{\text{д}}^{\text{після}} = 340 \text{ од.}$$

$$K_{\text{ін.дет.}}^{\text{після}} = 4500 / 340 \approx 13,2353 \text{ грн / од.} \approx 13,24 \text{ грн / од.}$$

Економія витрат на інструмент при виготовленні однієї деталі:

$$E_{\text{ін}} = K_{\text{ін.дет.}}^{\text{до}} - K_{\text{ін.дет.}}^{\text{після}} \quad (4)$$

$$E_{\text{ін}} = 21,875 - 13,2353 \approx 8,6397 \text{ грн / од.} \approx 8,64 \text{ грн / од.}$$

Розрахункова кількість деталей, необхідна для окупності вартості державки:

$$N_{\text{ок}} = K_{\text{дер}} / E_{\text{ін}}. \quad (5)$$

де  $K_{\text{дер}}$  – вартість державки, грн.

Вартість державки:  $K_{\text{дер}} = 3200 \text{ грн.}$

$$N_{\text{ок}} = 3200 / 8,6397 \approx 371 \text{ деталь};$$

Прогнозна річна економія витрат на ріжучий інструмент:

$$E_{\text{ін.р.}} = (E_{\text{ін.}} \cdot N_{\text{д.м.}}) \cdot 12, \quad (6)$$

де  $N_{\text{д.м.}}$  – місячний обсяг виробництва (прогноз), од.

Для  $N_{\text{д.м.}} = 1400 \text{ од./міс.}$

Економія за місяць:  $8,6397 \cdot 1400 \approx 12095,6 \text{ грн / міс.}$

Економія на рік:  $12095,6 \cdot 12 \approx 145,1 \text{ тис. грн / рік.}$

Таблиця 2 – Підсумкові результати розрахунків ефективності удосконаленої технології токарної обробки

| Показник                                                   | Значення           |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| $N_{\text{д.пл}}^{\text{до}}$ , дет./пласт.                | 22,07              |
| $N_{\text{д.пл}}^{\text{після}}$ , дет./пласт.             | 37,78              |
| Зростання ресурсу, %                                       | 41,59              |
| Витрати на інструмент до впровадження технології, грн/дет. | 21,88              |
| Витрати після впровадження технології, грн/дет.            | 13,24              |
| Економія, грн/дет.                                         | 8,64               |
| Окупність, дет.                                            | $\approx 371$      |
| Річна економія, грн                                        | $\approx 145\ 147$ |

Джерело: розроблено авторами.

Отримані в результаті дані свідчать про те, що застосування запропонованої технології дало змогу збільшити ресурс інструменту майже на 42 %. Витрати на інструмент для однієї деталі забезпечують економію 8,7 грн на одиницю продукції. Визначено, що при вартості державки на рівні 3200 грн окупність буде досягнута вже після виготовлення приблизно 371 деталі. Враховуючи прогнозний обсяг 1400 деталей на місяць річна економія буде становити близько 145 тис. грн, що підтверджує високу ефективність запропонованої технології. Зменшення частоти заміни інструменту буде сприяти скороченню простоїв обладнання, підвищить продуктивність праці та стабільність процесу різання.

**Висновки.** Результати, отримані в процесі дослідження, підтвердили ефективність застосування у процесі токарної обробки деталей складної конфігурації із сірого чавуну державки типу «TCBNL 2525 M12». Саме використання двох державок різних типів у межах однієї операції дозволило більш рівномірно розподілити навантаження між інструментами, знизити динамічні впливи та підвищити стабільність процесу різання. У результаті зношеність ріжучих пластин зменшилась майже вдвічі, а ресурс їх використання збільшився на 42 %. Своєю чергою, зменшення частоти заміни ріжучого інструменту скоротило простої обладнання та позитивно вплинуло на рівень продуктивності праці. Саме поліпшення якості оброблених поверхонь складної конфігурації і зниження рівня їх браку забезпечили зменшення обсягів доведення деталей. Економічний ефект від впровадження запропонованої технології становить близько 145 тис. грн на рік. Отримані результати підтверджують, що запропонована вдосконалена технологія забезпечує комплексний технічний, економічний та організаційний ефект, сприяє більш раціональному використанню інструментальних ресурсів підприємства і підвищує ефективність виробництва у машинобудуванні.

### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ у процесі написання текстів**

Ми, Олександр Леонідович Пузирьов та Андрій Іванович Гречка, підтверджуємо, що під час підготовки наукової статті «Інноваційні підходи до підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей» було використано інструменти генеративного ШІ (ChatGPT (OpenAI)) виключно як допоміжний засіб для перевірки граматики тексту статті та стилістичного опрацювання тексту анотації.

Використання зазначених технологій мало суто технічний та мовний характер і не впливало на зміст наукових результатів, логіку викладення матеріалу, обґрунтованість висновків чи інтерпретацію отриманих даних.

Підтверджуємо, що використання генеративного ШІ відповідає принципам академічної доброчесності та не порушує авторського права. Автори повністю несуть відповідальність за достовірність, новизну та наукову коректність поданих матеріалів.

### **Список використаних джерел**

1. Кузнєцов, Ю. М., Луців, І. В., Шевченко, О. В., & Волошин, В. Н. (2011). *Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: монографія*. Тернопіль: Терно-граф.
2. Солоха, В. В., Іщенко, Л. Й., Бойко, І. А., Коцюба, В. Ю., & Карнаух, В. Л. (2020). *Обладнання для новітніх технологій: навчальний посібник*. ПАТ «Мотор Січ».
3. Паливода, Ю. Є., Дячун, А. Є., & Лещук, Р. Я. (2019). *Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник*. ТНТУ ім. І. Пулюя.

4. Гевко, Б. М., та ін. (2014). *Технологія обробки на верстатах з ЧПК : навчальний посібник*. Крок.
5. Буц, Б. Д., Приходько, В. Є., & Ткачов, Ю. В. (2005). *Розрахунок режимів різання металів : навчальний посібник*. РВВ ДНУ.
6. Дідик, Р. П., Ткачов, Ю. В., Олейниченко, В. Г., та ін. (2005). *Методологія визначення параметрів і умов механічної обробки матеріалів : навчальний посібник для машинобудівних спеціальностей вузів*. НГУ.
7. Іванов, В. А., & Петренко, О. М. (2019). *Оптимізація режимів різання у металообробці*. Наукова думка.
8. Федоров, Ю. М. (2021). *Технологія механічної обробки металів*. ДНУ.
9. Карпусь, В. Є., Котляр, О. В., & Іванов, В. О. (2012). *Оптимізація механічної обробки тіл обертання* (В. Є. Карпусь, Ред.). НТМТ.
10. Кравець, Р. М. (2018). *Моделювання процесів різання для підвищення ефективності металообробки*. Львівська політехніка.
11. Новіков, Ф. В. (2014). *Математичне моделювання та оптимізація процесів металообробки: Монографія*. ХНЕУ ім. С. Кузнеця.

### References

1. Kuznietsov, Yu. M., Lutsiv, I. V., Shevchenko, O. V., & Voloshyn, V. N. (2011). *Tekhnologichne osnashchennia dlia vysokoeфекtyvnoi obrobky detalei na tokarnykh verstatakh: monohrafiia* [Technological equipment for high-efficiency machining of parts on lathes: monograph]. Terno-Hraf.
2. Solokha, V. V., Ivshchenko, L. Y., Boiko, I. A., Kotsiuba, V. Yu., & Karnaukh, V. L. (2020). *Obladnannia dlia novitnikh tekhnologii: navchalnyi posibnyk* [Equipment for advanced technologies: textbook]. PJSC "Motor Sich".
3. Palyvoda, Yu. Ye., Diachun, A. Ye., & Leshchuk, R. Ya. (2019). *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky: navchalno-metodychnyi posibnyk* [Tool materials, cutting modes, and technical standardization of machining: study guide]. TNTU named after Ivan Puluj.
4. Hevko, B. M., et al. (2014). *Tekhnologhiia obrobky na verstatakh z ChPK* [Technology of machining on CNC machines]. Krok.
5. Buts, B. D., Prykhodko, V. Ye., & Tkachov, Yu. V. (2005). *Rozrakhunok rezhymiv rizannia metaliv: navchalnyi posibnyk* [Calculation of metal cutting modes: study guide]. RVV DNU.
6. Didyk, R. P., Tkachov, Yu. V., Oleinychenko, V. H., et al. (2005). *Metodologhiia vyznachennia parametriv i umov mekhanichnoi obrobky materialiv: navchalnyi posibnyk dlia mashynobudivnykh spetsialnostei vuziv* [Methodology for determining parameters and conditions of material machining: textbook for mechanical engineering specialties]. NGU.
7. Ivanov, V. A., & Petrenko, O. M. (2019). *Optimizatsiia rezhymiv rizannia u metaloobrobtsi* [Optimization of cutting modes in metalworking]. Kyiv: Naukova Dumka.
8. Fedorov, Yu. M. (2021). *Tekhnologhiia mekhanichnoi obrobky metaliv* [Technology of mechanical metalworking]. DNU.
9. Karpus, V. Ye., Kotliar, O. V., & Ivanov, V. O. (2012). *Optimizatsiia mekhanichnoi obrobky til obertannia* [Optimization of machining of rotational bodies] (V. Ye. Karpus, Ed.). NTMT.
10. Kravets, R. M. (2018). *Modeliuvannia protsesiv rizannia dlia pidvyshchennia efektyvnosti metaloobrobky* [Modeling of cutting processes to increase metalworking efficiency]. Lviv Polytechnic.
11. Novikov, F. V. (2014). *Matematychnе modeliuvannia ta optymizatsiia protsesiv metaloobrobky* [Mathematical modeling and optimization of metalworking processes]. KhNEU named after S. Kuznets.

Дата першого надходження статті до видання: 10.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.11.2025

**Andrii Hrechka<sup>1</sup>, Oleksandr Puzyrov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics  
Central Ukrainian National Technical University (Kropyvnytskyi, Ukraine)

**E-mail:** [angre17@ukr.net](mailto:angre17@ukr.net), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1188-7412>

<sup>2</sup>PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Applied Mechanics Department  
Robert Elvorti Economics and Technology Institute (Kropyvnytskyi, Ukraine)

**E-mail:** [alpu@i.ua](mailto:alpu@i.ua), **ORCID:** ID <https://orcid.org/0000-0002-2158-3714>

**INNOVATIVE APPROACHES TO IMPROVING  
THE EFFICIENCY OF MECHANICAL PROCESSES**

*The article presents an innovative technology for machining components aimed at increasing production efficiency and ensuring the rational use of tooling resources. A comparative analysis of conventional and improved technological schemes of turning operations for gray cast iron parts was carried out, identifying key factors that influence productivity and tool wear. During a single technological operation, two tool holders of different types are used, providing a balanced distribution of cutting loads, improved process stability, and extended tool life. The implementation of a tool holder of the "TCBNL 2525 M12" type allows for more complete utilization of cutting insert edges, reduction of dynamic loads, and improvement of machining accuracy under variable cutting conditions. Experimental results demonstrated that the application of the improved machining technology increased tool life by 42%, reduced tooling costs, and decreased overall processing time. The economic analysis confirmed the feasibility of the proposed solution: the cost of cutting tools per part decreased by almost 40%, and the payback period is achieved after producing approximately 370 parts. Moreover, the integration of the improved tool holder contributed to reducing tool replacement downtime, lowering defect rates, and enhancing surface quality. It is determined that the proposed innovative approach to machining and rational use of cutting tools provides a comprehensive technical, organizational, and economic effect. The obtained results confirm that the implementation of such solutions increases labor productivity, improves production reliability, reduces resource consumption, and contributes to the sustainable development and competitiveness of machine-building enterprises.*

**Keywords:** innovative technology; machining; cutting tool; tool holder; production efficiency; economic feasibility.

**Fig.:** 6. **References:** 11.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-63-74](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-63-74)

УДК 621.792.6:004.94

**Сергій Владиславович Олексієнко<sup>1</sup>, Світлана Михайлівна Ющенко<sup>2</sup>,  
Михайло Миколайович Руденко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва,  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [sv.oleks@stu.cn.ua](mailto:sv.oleks@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>  
ResearcherID: F-8197-2014. SCOPUS Author ID: 57190370561

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва,  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [rasssveta@stu.cn.ua](mailto:rasssveta@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>  
ResearcherID: F-7741-2014. SCOPUS Author ID: 57190373626

<sup>3</sup>старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва,  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [m.rudenko@stu.cn.ua](mailto:m.rudenko@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>  
ResearcherID: G-6235-2014. SCOPUS Author ID: 57190378153

## КОНСТРУЮВАННЯ СКЛО-КРЕМНІЄВИХ ВУЗЛІВ ДАТЧИКІВ ТИСКУ ТА ВПЛИВ ЇХНІХ РОЗМІРНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ

*Якість з'єднання кремнію зі склом при зварюванні у твердій фазі в електростатичному полі високої напруги залежить від кількості електрики, яка проходить через нього при зварюванні, та пікового значення струму на початку процесу зварювання. У роботі встановлено вплив поверхневої провідності скляних деталей на завершеність процесу зварювання. Визначено вплив розмірних параметрів скляних деталей на протікання процесу зварювання та на міцність з'єднань. Проведено комп'ютерне моделювання напруженого стану у вузлах. Розроблено рекомендації щодо конструювання скло-кремнієвих вузлів.*

**Ключові слова:** скло; кремній; зварювання; конструювання; залишкові напруження; міцність.

Рис.: 8. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** Висока чутливість напівпровідникових п'єзоре-зистивних елементів обумовила їх широке використання в датчиках для вимірювання статичних та динамічних тисків [1]. Під дією механічного напруження електричний опір напівпровідників збільшується на 1-2 порядки в порівнянні з металами, тому використання п'єзорезистивного ефекту дозволило покращити рівень корисного сигналу та чутливість приладів, а також спростити обробку сигналів.

Ключем до створення чутливих до тиску елементів стало використання мембран із монокристалічного кремнію. Перетворення тиску, що вимірюється, в пропорційний електричний сигнал здійснюється за рахунок прогину пружної мембрани під односторонньою дією тиску. Вмонтований у мембрану методом дифузії міст Вітстона, що складається із напівпровідникових резисторів, піддається при цьому розбалансу пропорційно прикладеному тиску. У кожному напівмості опори резисторів змінюються протилежно, що обумовлено положенням останніх на кремнієвій мембрані.

З метою забезпечення можливості найбільш універсального застосування датчика чутливий елемент у ньому монтують таким чином, щоб він був захищений від сторонньої механічної та хімічної дії. Для цього корпус датчика виготовляють із нержавіючої сталі, а для ізоляції мембрани від металічного корпусу її монтують на прохідному ізоляторі, для виготовлення якого використовують боросилікатне скло «Пірекс» [2] (рис. 1).

При промисловому застосуванні датчиків тиску визначальним фактором є похибка вимірів. Стабільність метрологічних характеристик датчиків може бути забезпечена в тому випадку, коли прийом прикріплення кремнієвої мембрани до корпусу з діелектрика забезпечує мінімальні залишкові напруження в мембрані та здійснюється при температурах не більших 673 К [3]. Остання вимога направлена на збереження вихідних фізико-хімічних властивостей легованого кремнію. Тому при створенні прецизійних вузлів накладають певні обмеження на вибір способу отримання нероз'ємного з'єднання.

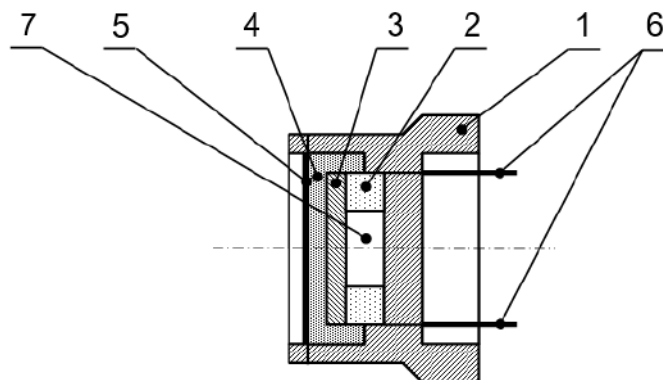


Рис. 1. Елемент датчика тиску з кремнієвим чутливим елементом [1]:

1 – корпус із нержавіючої сталі; 2 – скляний ізолятор; 3 – мембрана (чутливий елемент); 4 – силіконове мастило; 5 – гофрована мембрана; 6 – електричні виводи; 7 – порожнина за мембраною

Останнім часом перспективним способом з'єднання кремнію зі склом є спосіб зварювання в твердій фазі, який може здійснюватися в атмосфері повітря, при невисоких температурах, з використанням незначних зовнішніх зусиль стиснення та з прикладенням електростатичного поля високої напруги. В основу процесу покладено нагрів матеріалів, контактні поверхні яких відполіровані, та подача високої електричної напруги, причому повинна дотримуватись полярність: на кремній подається «+», а на скло «-» [4]. Виключення зовнішнього стискаючого зусилля як одного з параметрів зварювання в твердій фазі стало можливим через те, що при цьому способі зварювання виникають електростатичні сили стиснення між контактуючими поверхнями. Під дією електростатичних сил стиснення поверхні притягуються одна до одної, у результаті чого утворюється фізичний контакт. Витримка під напругою протягом певного часу сприяє збільшенню міцності зварного з'єднання завдяки проходженню через скло струму і розвитку міграційної поляризації та електрохімічних процесів в зоні зварювання [5-7].

**Постановка проблеми.** Як вказується в [8], всі явища, що відбуваються при зварюванні кремнію зі склом, пов'язані з рухомістю іонів натрію. Пов'язаний з іонним струмом «натрієвий ефект» призводить до протікання гетерогенних електрохімічних процесів. У результаті цих процесів в прианодній області скла, що безпосередньо прилягає до анода, залишаються некомпенсовані заряди аніонів кисню, які і беруть участь в утворенні з'єднання скла з кремнієм на основі окиснювальних процесів. Отже, при недостатньому часі зварювання не забезпечується в повному обсязі реалізація комплексу фізико-хімічних процесів, які обумовлюють утворення зварного з'єднання, яке відповідало б вимогам міцності та вакуумної щільності. З іншої сторони, при занадто довгій витримці скло-кремнієвого вузла, що зварюється, під електричною напругою може відбутися зменшення його міцності [9]. Саме тому повинен бути обґрунтованим час витримки скло-кремнієвих з'єднань під зварювальною напругою протягом процесу зварювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [10] показана можливість візуального контролю за процесом зварювання: по різкому спаданню струму зварювання (рис. 2 [8]) та по сірому кольору, що з'являється в зоні з'єднання.

Як вказується у роботах [4; 11], чіткий взаємозв'язок між формуванням з'єднання та контрольованими параметрами зварювання дає залежність зміни струму зварювання в часі, яка визначає кількість електрики, що проходить через з'єднання.

Експеримент, що відображає формування з'єднання у часі й заповнення повітряного зазору продуктом реакції, був проведений автором [8]. Доказом наявності повітряного зазору перед зварюванням є інтерференційні смуги рівної товщини, виявлені при спостереженні збірки скла з кремнієм перед зварюванням зі сторони скла у білому світлі (рис. 3, а).

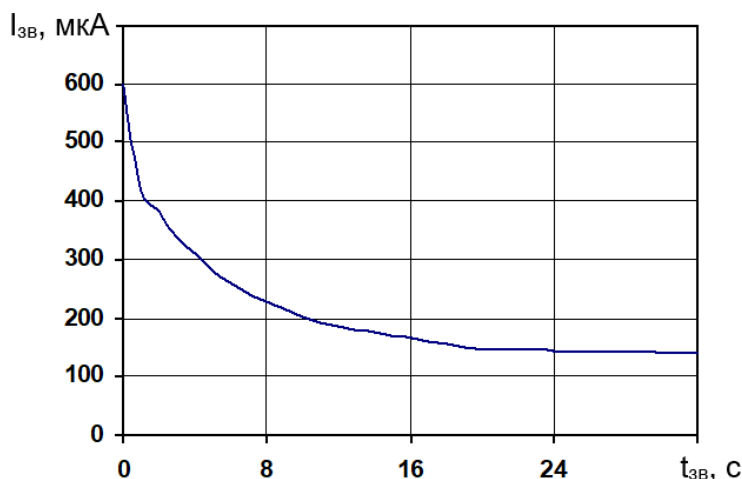


Рис. 2. Характер зміни зварювального струму в процесі зварювання [8]

При зварюванні від'ємний потенціал подавали на скло за допомогою тонкого дрітчастого електрода.

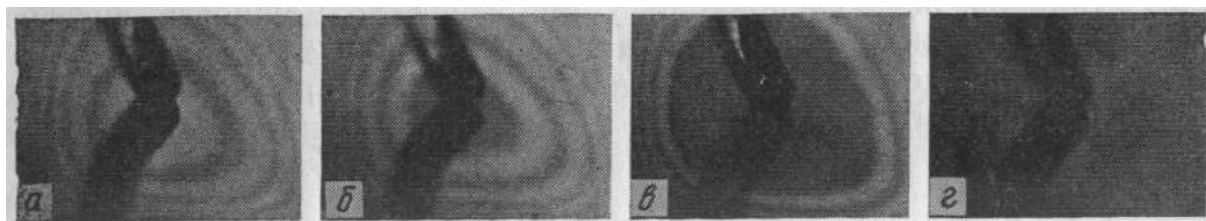


Рис. 3. Зміна інтерференційної картини в контактній зоні скла з кремнієм у часі ( $U_{зв} = 400$  В,  $T_{зв} = 673$  К) [8]

Під дією прикладеної електричної напруги інтерференційні смуги поступово зміщувались до периферії пластинки (рис. 3, б, в), а потім повністю зникали (рис. 3, г). Після цього утворювалось однотонне сіре забарвлення в зоні з'єднання кремнію зі склом.

Автори роботи [11] вказують на те, що за отриманою кривою спадання струму зварювання у часі можна здійснювати контроль над завершеністю процесу зварювання шляхом визначення повного заряду (кількості електрики), що пройшов через з'єднання:

$$Q = \int_0^t I dt, \quad (1)$$

де  $Q$  – кількість заряду, мкКл;

$I$  – зварювальний струм, мкА;

$t$  – час зварювання, с.

Універсальність цієї кривої зумовлена тим, що вона не залежить від того, при яких температурі та електричній напрузі отримано з'єднання, а важливо, щоб через з'єднання в усіх випадках пройшла певна кількість електрики.

Кількісну характеристику процесу зварювання в електростатичному полі кремнію марки КЕФ-4,5/0,1 зі склом «Пірекс» дав автор роботи [4]. Для вказаної пари матеріалів питома кількість електрики складає  $411$  мкКл/мм<sup>2</sup> номінальної площі контакту. Однак проведені автором механічні випробування вузлів, через які при зварюванні пропускали

однакову кількість електрики, та оцінка отриманих результатів вказують на те, що при використанні такого способу контролю за процесом зварювання тільки 60 % від загальної кількості випробуваних вузлів відповідає нормативній міцності, що складає величину не менше 12 МПа (рис. 4).

Як вказується у роботі [12], вимога до границі міцності скла в з'єднаннях з металами не нижче 12 МПа при випробуванні на одновісний розтяг зумовлена забезпеченням вакуумної щільності зварних вузлів.

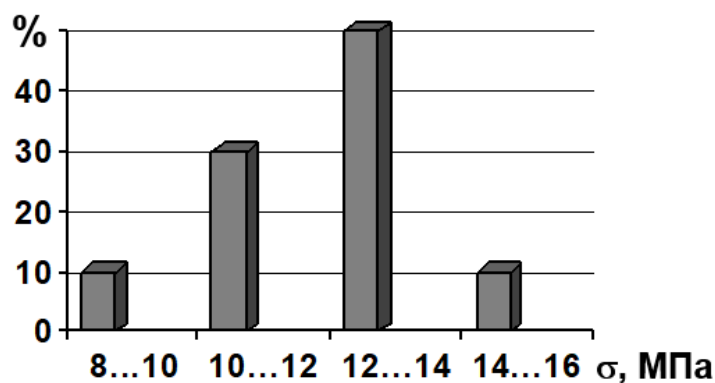


Рис. 4. Гістограма розподілу міцності зварних вузлів [4]

Автором роботи [8] була встановлена загальна тенденція впливу температури, електричної зварювальної напруги та часу зварювання на надійність з'єднань при постійному класі шорсткості поверхонь, що зварюються. За результатами механічних випробувань скло-кремнієвих вузлів показано, що збільшення процента виходу якісних вузлів з гарантованим проваром пов'язане зі збільшенням всіх трьох технологічних параметрів: температури, напруги та часу зварювання (рис. 5).

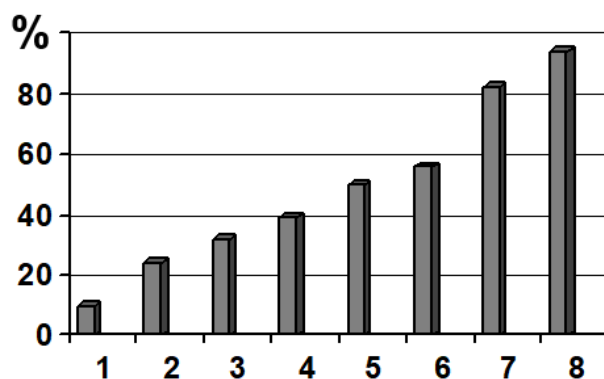


Рис. 5. Номограма кількісної залежності процента виходу якісних вузлів від режимів зварювання [8]

- 1 –  $U_{зв} = 200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 1 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 623 \text{ К}$ ; 2 –  $U_{зв} = 200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 11 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 623 \text{ К}$ ;  
 3 –  $U_{зв} = 1200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 1 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 623 \text{ К}$ ; 4 –  $U_{зв} = 200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 1 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 723 \text{ К}$ ;  
 5 –  $U_{зв} = 1200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 11 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 623 \text{ К}$ ; 6 –  $U_{зв} = 200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 11 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 723 \text{ К}$ ;  
 7 –  $U_{зв} = 1200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 1 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 723 \text{ К}$ ; 8 –  $U_{зв} = 1200 \text{ В}$ ,  $t_{зв} = 11 \text{ хв}$ ,  $T_{зв} = 723 \text{ К}$

Тобто при постійних температурах та часі витримки виробів під електричною зварювальною напругою збільшення останньої відповідає більшому значенню струму, що проходить через виріб. Іншими словами, збільшення пікового струму зварювання на початку процесу дозволяє повною мірою реалізувати весь комплекс фізико-хімічних процесів, які відповідають за отримання якісних вузлів з гарантованим проваром за більш короткий час.



Враховуючи, що значення поверхневої провідності скла є непостійним параметром [13; 14] і залежить від площі поверхні скляних деталей, низький процентний вихід якісних вузлів можна пояснити різним характером проходження струму через них.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У вітчизняних та закордонних джерелах відсутня інформація стосовно дослідження впливу розмірних параметрів скляних деталей з погляду їх впливу на завершеність процесу зварювання і, відповідно, на міцність скло-кремнієвих з'єднань. Лише автори роботи [15] встановили негативний вплив на міцність скла надмірної кількості електрики, яка пройшла через з'єднання, при використанні трубчастих скляних деталей з різним співвідношенням номінальної площі контакту до сумарного периметра бокових поверхонь.

**Мета дослідження.** Мета роботи – визначити вплив розмірних параметрів скляних деталей на завершеність процесу зварювання та на міцність скло-кремнієвих з'єднань.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

- 1) визначити загальні принципи визначення завершеності процесу зварювання залежно від впливу коливань значень струму при зміні співвідношення номінальної площі контакту до сумарного периметра бокових поверхонь трубчастих скляних деталей;
- 2) дослідити характер розподілу полів залишкових напружень у з'єднаннях;
- 3) розробити рекомендації стосовно вибору розмірних параметрів скло-кремнієвих вузлів та ключових параметрів процесу зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** Вказані матеріали у процесі виготовлення із них деталей піддають різній механічній, хімічній та термічній дії (шліфування, полірування, дифузійне насичення домішками, розділення на заготовки, напилення тензорезистивних схем та захисних покриттів). При цьому в структурних елементах датчиків виникають дефекти, що знижують їх механічну міцність (нааявність на поверхнях і в об'ємі елементів тріщин, подряпин, включень та неоднорідностей).

Міцність кремнієвих елементів у з'єднаннях також може різко змінитись при використанні завищених зварювальних режимів (температури зварювання та питомого тиску [16]). Зокрема, при температурі вище  $673\text{ K}$  у кремнії під дією зовнішнього навантаження з'являється пластична деформація, і руйнівне напруження зменшується з ростом температури [17]. Тому важливим при цьому є використання у процесі зварювання некритичних зовнішніх стискаючих зусиль, а у випадку виготовлення мініатюрних виробів і повне їх виключення.

З указаних причин ми обрали максимально можливу температуру зварювання  $673\text{ K}$ , оскільки при збільшенні температури зварювання збільшується вихід якісних вузлів (рис. 5). Така температура зварювання не вплине на зміну початкових розмірів деталей зі скла при зварюванні, оскільки для боросилікатних стекел температура склування, тобто нижня температура розм'якшення скла, не нижча за  $673\text{ K}$ .

Електрична напруга зварювання була обмежена допустимими щільностями струму для запобігання виникнення пропалів та непроварів у контактній зоні внаслідок розвитку електророзрядних процесів у повітряному зазорі [12]. Найбільша щільність струму не перевищувала  $50\text{ мкА/мм}^2$ .

Питоме зусилля стиснення відігравало роль фіксуючого й дорівнювало  $0,1\text{ МПа}$ . Зусилля стиснення такої величини, як показали наші експериментальні дослідження, не призводить до розтріскування кремнієвих мембран товщиною  $0,15\text{ мм}$ , на поверхню яких нанесені тензорезистивні схеми.

У такому випадку формування зварного з'єднання обумовлюється лише електростатичною взаємодією матеріалів та комплексом електрохімічних процесів, зумовлених проходженням через них електричного струму.

У процесі виготовлення зварних з'єднань використовувались кремнієві пластини та трубчасті скляні деталі, контактні поверхні яких були поліровані (14 клас шорсткості).

З метою виявлення впливу поверхневої провідності скляних деталей на пікові значення струму зварювання та характер зміни його у часі для зварювання кремнію зі склом були використані трубчасті скляні деталі, які мали приблизно однакову номінальну площу контакту, однакову висоту, але різну величину периметра бокових поверхонь – довжину зовнішньої та внутрішньої бокових поверхонь (партії зразків № 1 та № 2).

При умові, що в усіх випадках зварювання через з'єднання пропускали однакову кількість електрики, площа зон з'єднання відрізнялась (рис. 6).

Залежності струму зварювання відрізнялися піковими значеннями струму зварювання та процентом спадання струму зварювання у часі (табл. 1).



Рис. 6. Знімки зон з'єднання, що відповідають скляним деталям із різною величиною периметрів бокових поверхонь ( $U_{зв} = 800 \text{ В}$ ;  $Q = 4000 \text{ мкКл}$ )

Встановлено, що при сталих параметрах режиму зварювання скляним зразкам із більшим сумарним периметром при незмінній висоті відповідає більше пікове значення струму зварювання, більша площа зони з'єднання, менший час зварювання та менший процент спадання струму зварювання у часі.

Розрахунок площі зони з'єднання проводили точковим методом. Якість зварних з'єднань визначалася випробуванням на відрив кремнієвої мембрани від скла. Розрахунки показали, що міцність зварного з'єднання прямо пропорційна площі зони з'єднання, якій відповідає сіре забарвлення. Руйнування з'єднань відбувалось по склу.

З отриманих результатів випливає, що метод визначення часу зварювання за питомою кількістю електрики, яка проходить через з'єднання при зварюванні, має недоліки і потребує коригування залежно від співвідношення номінальної площі контакту до сумарного периметру бокових поверхонь скляних деталей  $A_0/S_{\Sigma}$ .

Як вказується в роботах [4, 11], витримка скло-кремнієвого вузла під електричною напругою протягом певного часу забезпечує проходження через з'єднання певної кількості електрики, яка має розмірність  $\text{Кл}$  або  $\text{мкА}\cdot\text{с}$ . Протягом процесу зварювання відбувається доставка атомів та іонів із скла силами електричного поля до поверхні кремнію, відбуваються процеси фізичної та хімічної адсорбції, протікають процеси іонної міграції іонів кисню в об'єм оксиду. Заключними процесами є взаємодія активованих іонів кисню з іонами кремнію та ріст зв'язуючого оксидного продукту.

Таблиця 1 – Результати дослідження зон з'єднання при зварюванні кремнію зі скляними деталями із різним сумарним периметром бокових поверхонь

| Партії зразків                                                            | № 1   | № 2   |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|-------|
| Номинальна площа $A_0$ , мм <sup>2</sup>                                  | 20,28 | 20,49 |
| Периметр зовнішній $S_z$ , мм                                             | 22,61 | 19,63 |
| Периметр внутрішній $S_b$ , мм                                            | 16,01 | 11,30 |
| Сумарний периметр $S_\Sigma$ , мм                                         | 38,62 | 30,93 |
| Відношення $A_0/S_\Sigma$ , мм                                            | 0,53  | 0,66  |
| Пікове значення струму $I_{\text{пик}}$ , мкА                             | 830   | 760   |
| Кількість електрики, що пройшла через з'єднання при зварюванні $Q$ , мкКл | 4000  | 4000  |
| Процент спадання струму у часі, % <sub>с.с.</sub>                         | 65    | 74    |
| Час зварювання $t_{зв}$ , с                                               | 15    | 20    |
| Площа зони з'єднання $A_z$ , мм <sup>2</sup>                              | 15,17 | 9,92  |
| Міцність з'єднань $\sigma_b$ , МПа                                        | 9,5   | 6,15  |

Відповідно до [4] об'єм зв'язуючого продукту в повітряному зазорі можна визначити таким чином:

$$V_{\text{пз}} = \frac{QM}{4F\rho}, \quad (2)$$

де  $Q$  – кількість електрики, що проходить через з'єднання, Кл;

$M$  – молекулярна маса діоксиду кремнію ( $M_{\text{SiO}_2} = 60$  г/моль);

$F$  – число Фарадея ( $9,648531 \cdot 10^4$  Кл);

$\rho$  – густина діоксиду кремнію ( $2,21 \cdot 10^{-3}$  г/мм<sup>3</sup>).

Експерименти, наведені в табл. 1, вказують на те, що у випадку збільшення пікового значення струму при проходженні однакої кількості електрики ми маємо утворення з'єднання по більшій частині номінальної площі контакту поверхонь (рис. 6). Оскільки при проходженні однакої кількості електрики об'єм зв'язуючого продукту в усіх випадках однаковий, більша площа зони з'єднання пояснюється більшим зближенням поверхонь під дією електростатичних сил стиснення та, відповідно, меншим об'ємом зазору між контактуючими поверхнями.

Експериментальним шляхом визначено часові залежності тривалості зварювання кремнію марки КЕФ-4,5/0,1 зі склом «Пірекс» у межах пікових значень щільностей струму зварювання від  $10$  мкА/мм<sup>2</sup> до  $50$  мкА/мм<sup>2</sup>. Оцінка якості скло-кремнієвих з'єднань здійснювалась за допомогою оптичної мікроскопії (за 100%-вою наявністю провару в контактній зоні) та за результатами механічних випробувань методом відриву кремнієвої мембрани від скла (при руйнуванні по склу з границею міцності не менше  $12$  МПа або при руйнуванні по склу та кремнію). Залежність часу зварювання  $t_{зв}$  у секундах від значення  $j_{\text{пик}}(x)$  апроксимована в поліноміальну функцію четвертого ступеня:

$$t_{зв} = -4 \cdot 10^{-5} x^4 + 0,0067 x^3 - 0,1733 x^2 - 24,734 x + 1156. \quad (3)$$

Оскільки призначення та конструкція датчиків різноманітна, в подальших дослідженнях використовувалися трубчасті скляні деталі, які мали однакову висоту, але різне відношення  $A_0/S_\Sigma$ . Результати механічних випробувань на відрив кремнію від скла наведені в табл. 2.

Результати механічних випробувань показали, що при збільшенні величини відношення  $A_0/S_\Sigma$  трубчатих скляних деталей пікове значення щільності струму знижується, кількість електрики, необхідна для утворення якісного з'єднання, збільшується, а при руйнуванні по склу зафіксована менша міцність. Причому випадків, коли руйнування зразків відбувалось із частковими виривами по кремнію, зафіксовано також більше при збільшенні відношення  $A_0/S_\Sigma$ .

Таблиця 2 – Результати механічних випробувань скло-кремнієвих вузлів

| Партії зразків                                                                                               | № 3   | № 4   | № 5   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Кількість випробуваних зразків                                                                               | 50    | 50    | 50    |
| Номинальна площа контакту $A_0$ , мм <sup>2</sup>                                                            | 15,71 | 25,45 | 35,73 |
| Сумарна довжина бокової поверхні скла $S_\Sigma$ , мм                                                        | 31,40 | 33,91 | 34,85 |
| Відношення $A_0/S_\Sigma$ , мм                                                                               | 0,50  | 0,75  | 1,02  |
| Пікове значення щільності струму $j_{\text{пик}}$ , мкА/мм <sup>2</sup> ( $U_{\text{зв}} = 1200 \text{ В}$ ) | 38,2  | 37,5  | 36,9  |
| Час зварювання $t_{\text{зв}}$ , с                                                                           | 247   | 259   | 270   |
| Кількість електрики, що пройшла через з'єднання при зварюванні $Q$ , мКл                                     | 3,86  | 6,48  | 9,30  |
| Середнє значення міцності зразків, міцність яких перевищувала 12 МПа $\sigma$ , МПа                          | 14,1  | 13,3  | 12,7  |
| % зразків, які мали міцність нижче 12 МПа                                                                    | 12    | 19    | 28    |

Утворення тріщин у кристалі кремнію при експлуатації, а в нашому випадку – наявність часткових виривів по кремнію при механічних випробуваннях скло-кремнієвих зразків, пояснюється наявністю залишкових внутрішніх напружень у кристалі.

Тому було досліджено характер розподілу полів залишкових напружень в скло-кремнієвих з'єднаннях. Аналіз напруженого стану в з'єднаннях проведено з використанням розрахункової платформи ANSYS Workbench 2025 R2.

Розрахункова схема зварного скло-кремнієвого вузла представлена на рис. 7.

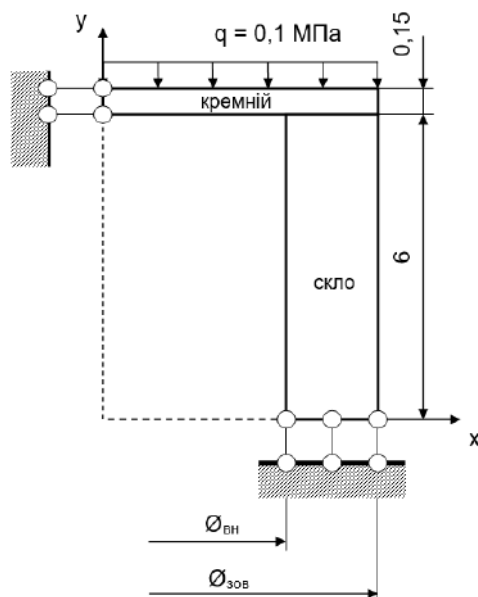


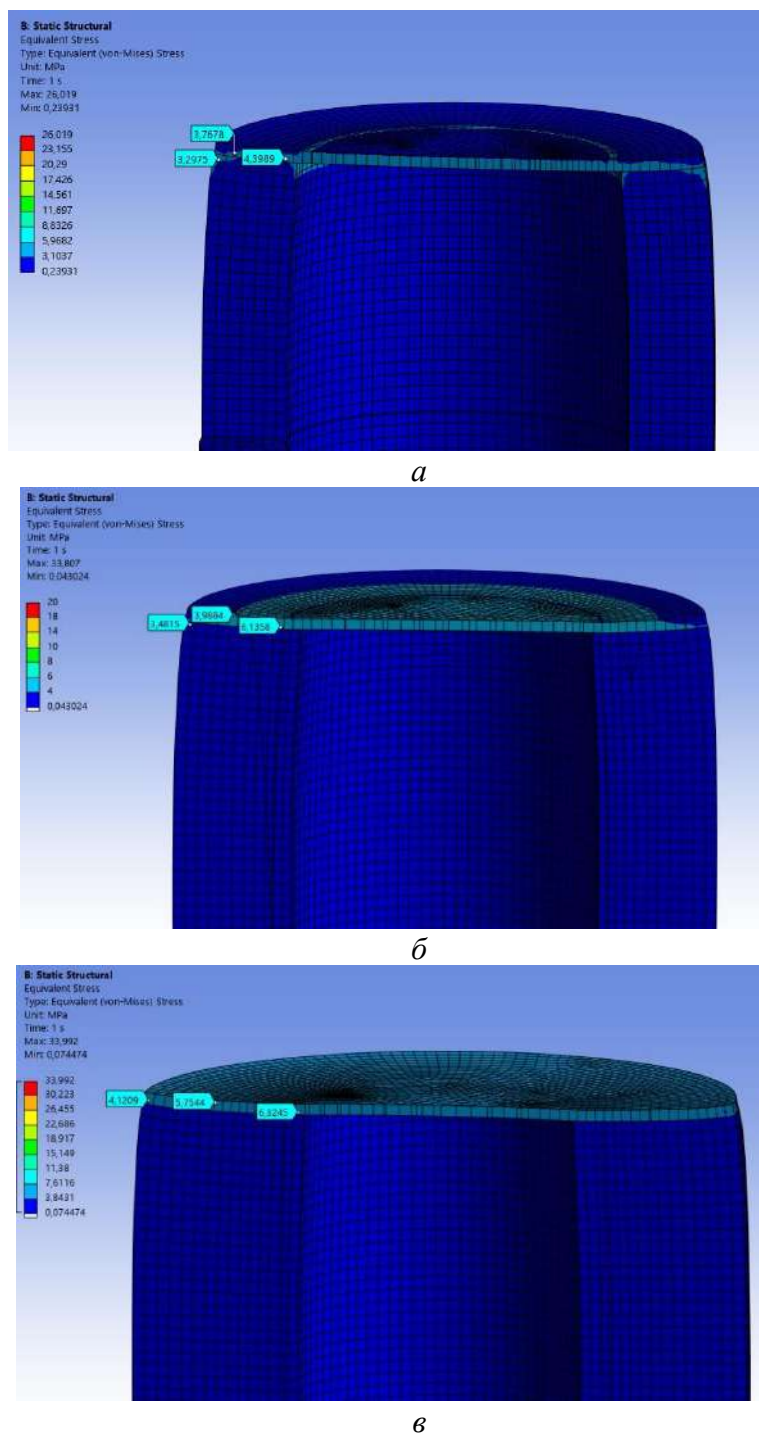
Рис. 7. Розрахункова схема скло-кремнієвого вузла

Розрахункові параметри скляних деталей наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахункові параметри скляних деталей для оцінки напруженого стану

| Партії зразків           | № 3 | № 4 | № 5 |
|--------------------------|-----|-----|-----|
| $\Phi_{\text{вн}}$ , мм  | 4,0 | 3,9 | 3,5 |
| $\Phi_{\text{зов}}$ , мм | 6,0 | 6,9 | 7,6 |

Розподілення еквівалентних залишкових напружень у вузлах зображені на рис. 8.

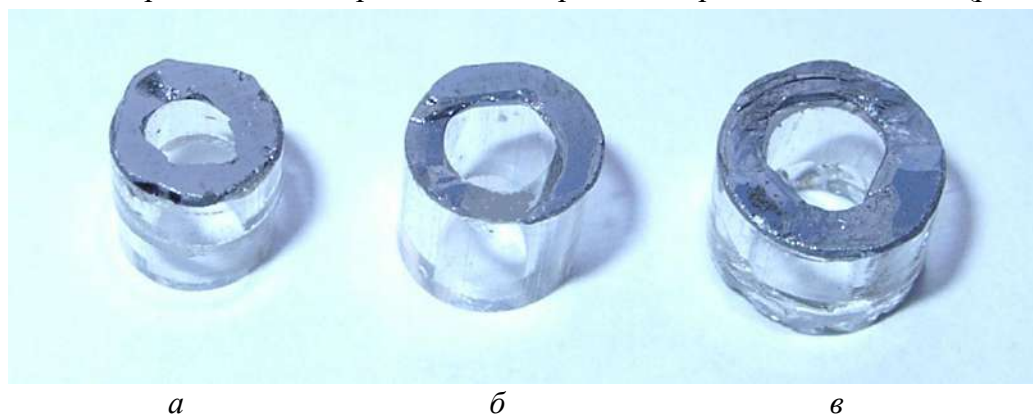


$a - A_0/S_\Sigma = 0,50 \text{ мм}; б - A_0/S_\Sigma = 0,75 \text{ мм}; в - A_0/S_\Sigma = 1,02 \text{ мм}$

Рис. 8. Розподілення напружень в скло-кремнієвих вузлах залежно від величини  $A_0/S_\Sigma$

Неметалеві матеріали значно гірше витримують розтягуючі напруження [18], тому критерієм для оцінки напруженого стану вузлів була величина еквівалентних розтягуючих напружень. Із представлених вище рисунків видно, що при збільшенні відношення номінальної площі контакту деталей до сумарного периметра бокових поверхонь трубчатої скляної деталі  $A_0/S_\Sigma$  еквівалентні розтягуючі напруження зростають.

Підтвердження результатів аналізу напруженого стану отримано при механічних випробуваннях зварних скло-кремнієвих вузлів, в яких товщина кремнієвої мембрани була рівна 0,15 мм, на продавлювання кремнієвої мембрани зі сторони скляної деталі (рис. 8).



*а* –  $A_0/S_\Sigma = 0,50$  мм; *б* –  $A_0/S_\Sigma = 0,75$  мм; *в* –  $A_0/S_\Sigma = 1,02$  мм

Рис. 8. Руйнування кремнієвих мембран в скло-кремнієвих вузлах залежно від величини  $A_0/S_\Sigma$

При збільшенні відношення  $A_0/S_\Sigma$  скляних деталей руйнування кремнієвих мембран супроводжувалося збільшенням розшарування по площині мембрани.

**Висновки.** Розроблено новий принцип визначення оптимального часу зварювання в твердій фазі в електростатичному полі кремнію зі склом, що дозволяє підвищити стабільність якості зварних скло-кремнієвих з'єднань шляхом врахування зміни електричного опору скляних деталей з різними геометричними параметрами та наявності у них поверхневої провідності.

Для підвищення міцності скла в з'єднаннях процес зварювання необхідно проводити з прикладенням максимально можливого рівня електричної зварювальної напруги, обмеженої величиною напруги перекриття скла, щільність струму не повинна перевищувати 50 мкА/мм<sup>2</sup>.

Для зменшення залишкових напружень з метою підвищення опору руйнуванню необхідно так конструювати скло-кремнієві вузли напівпровідникових датчиків, щоб відношення номінальної площі контакту деталей до сумарного периметра бокових поверхонь трубчастої скляної деталі мало мінімальне значення.

### Список використаних джерел

1. Kistler Instrumente AG. (1987). *Measurement with crystals: Piezoresistive instruments for measuring static and dynamic pressure*. Kistler Instrumente AG.
2. Хоменко, Н. Н., Задорожный, Ю. Г., Ковтун, С. И., Гнатюк, О. В., Матвеев, А. К., Логинова, А. С., & Саблин, А. В. (1984). *Полупроводниковый преобразователь давления* [Авторське свідоцтво СРСР № 106388]. Державний комітет СРСР у справах винаходів і відкриттів.
3. Моряков, О. С. (1982). *Сварка и пайка в полупроводниковом производстве*. Высш. школа.
4. Хоменко, Н. Н. (1997). *Научные и технологические основы электрохимической сварки в твердой фазе кристаллических материалов с ионопроводящими стеклами* [Докторська дисертація]. Київ.
5. Хоменко, Н. Н. (1982). Использование свойств стекла в процессе соединения его с кремнием во внешнем электрическом поле. *Электронная техника, сер. 6*, 2(162), 61-64.
6. Хоменко, Н. Н. (1986). Исследование поляризации стекол при их сварке с кремнием в электрическом поле. *Электронная техника, сер. 6*, 1(212), 60-62.
7. Орешкин, П. Т. (1997). *Физика полупроводников и диэлектриков*. Высш. школа.
8. Хоменко, Н. Н. (1985). *Технология и оборудование получения сварно-паяных соединений кремния и ковера со стеклом* [Кандидатська дисертація]. Чернігів.
9. Шлифер, С. Э., Ковшиков, Е. К., & Браун, А. Г. (1990). Влияние циклического нагружения на режимы и свойства диффузионной сварки в электростатическом поле полупроводников со стеклами. *Сварочное производство*, 5, 33-35.



10. Wallis, G. & Pomerantz, D. (1969). Field Assisted Glass-Metal Sealing. *Journal Applied Physics*, 40 (10), 3946-3949.
11. Таиров, В., Озолс, А., & Пшелко, Н. (1989). *Физические основы, расчет и применение необратимого электроадгезионного соединения твердых тел*. Ин-т орган. синтеза АН Латв. ССР.
12. Березин, Л. Я. (1990). *Технология и оборудование для получения вакуумплотных соединений узлов газоразрядного прибора* [Кандидатська дисертація]. Чернівці.
13. Stevels, J.M. (1957). *The Electrical Properties of Glass*. Handbuch der Physik.
14. Лосик, М. В., & Звір, О. М. (2018). *Технологічні та фізико-хімічні властивості скла: Навчальний посібник*. Львівська національна академія мистецтв.
15. Харченко, Г. К., Олексієнко, С. В., & Ганєєв, Т. Р. (2005). Аналіз міцності скло-кремнієвих з'єднань, отриманих зварюванням в твердій фазі в електростатичному полі. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, 25, 100-105.
16. Россошинский, А. А., Гавриленко, И. С. (1968). Образование трещин в монокристаллах кремния при сварке полупроводниковых приборов. *Электронная техника*, 10 (1), 40-43.
17. Жога, Л. В., Степанов, В. А., & Шпайзман, В. В. (1976). Хрупкое разрушение монокристаллов кремния. *Физика и электроника твердого тела*, 75-81.
18. Бачин, В. А. (1986). *Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами*. Машиностроение.

### References

1. *Measurement with crystals. Piezoresistive instruments for measuring static and dynamic pressure* (1987). Kistler Instrumente AG.
2. Khomenko, N. N., Zadorozhnyi, Yu. H., Kovtun, S. I., Hnatiuk, O. V., Matveev, A. K., Lohynova, A. S., & Sablyn, A. V. (1984). Poluprovodnykovyi preobrazovatel davleniya [Semiconductor pressure transducer] [Avtorske svidotstvo SRSR № 106388]. [Author's certificate of the USSR No. 106388] Derzhavnyi komitet SRSR u spravakh vynakhodiv i vidkryttiv- Derzhavnyi komitet SRSR u spravakh vynakhodiv i vidkryttiv.
3. Moriaikov, O. (1982). Svarka i paika v poluprovodnikovom proizvodstve [Welding and soldering in semi-conductor production]. Vyshaya shkola.
4. Khomenko, N. (1997). Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy svarki v tverdoj faze kristalicheskikh materialov s ionoprovodiashchimi steklami [Scientific and technological foundations of electrochemical welding in the solid phase of crystalline materials with ion-conducting glasses]. [Doctor's thesis, Kyiv].
5. Khomenko, N.N. (1982). Ispolzovanie svoistv stekla v protsesse soedyneniya ego s kremnyem vo vneshnem elektrycheskom pole. [Utilising the properties of glass in the process of combining it with silicon in an external electric field.] *Elektronnaya tekhnika, ser. 6, 2(162), 61-64.- Electronic Technology, vol. 6, 2(162), 61-64*
6. Khomenko, N. (1986). Issledovanie polarizatsii stekol pri ikh svarke s kremniyem v elektricheskoy pole [A study of the polarization of glasses when they are welded to silicon in an electric field.]. *Elektronnaya tekhnika, Ser. 6, Vol. 1 (212), (p. 60-62) - Electronic Technology, Ser. 6, Vol. 1 (212), (p. 60-62)*
7. Oreshkin, P. (1997). *Fizika poluprovodnikov i dielektrikov* [Physics of semiconductors and dielectrics]. Vyshaya shkola.
8. Khomenko, N. (1985). *Tekhnologiya i oborudovaniye polucheniya svarno-payanykh soedineniy kremniya i kovara so steklom* [Technology and equipment for obtaining welded-soldered joints of silicon and covar with glass]. [Candidate's thesis, Chernihiv].
9. Shlifer, S., Kovshikov, Ye., & Braun, A. (1990). Vliyanie tsyklicheskogo nagruzheniya na rezhimy i svoystva diffuzionnoy svarki v elektrostatischeckom pole poluprovodnikov so steklami [Influence of cyclic loading on modes and properties of diffusion welding in electrostatic field of semiconductors with glasses]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding process*, 5, 33-35.
10. Wallis, G. & Pomerantz, D. (1969). Field Assisted Glass-Metal Sealing. *Journal Applied Physics*, 40(10), 3946-3949.
11. Tairov, V., Ozols, A., & Pshchelko, N. (1989). *Fizicheskie osnovy, raschet i primeneniye neobratimogo elektroadgезionnogo soedineniya tverdykh tel* [Physical basis, calculation and application of irreversible electroadhesive compound of solid bodies]. Institut organicheskogo sinteza AN Latv. SSR.
12. Berezin, L. Ya. Л. Я. (1990). *Tekhnologiya i oborudovaniye dlya polucheniya vakuumplotnykh soedineniy uzlov gazorazryadnogo pribora* [Technology and equipment for vacuum-tight connections of gas-discharge device assemblies] [Candidate's thesis, Chernihiv].

13. Stevels, J.M. (1957). *The Electrical Properties of Glass*. Handbuch der Physik.
14. Losik, M. V., & Zvir, O. M. (2018). Tekhnologichni ta fizyko-khimichni vlastyivosti skla [Technological and physicochemical properties of glass]. LNAM.
15. Kharchenko, H. K., Oleksiienko, S. V., & Hanieiev, T. R. (2005). Analiz mitsnosti sklo-kremniievkykh ziednan, otrymanykh zvaryuvanniam v tverdii fazi v elektrostatychnomu poli [Strength analysis of glass-silicon compounds obtained by solid-phase welding in an electrostatic field]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnologichnoho universytetu – Journal of Chernihiv Polytechnic National University*, 25, 100-105.
16. Rossoshynskiy, A. A., & Gavrilenko, I. S. (1968). Obrazovaniye treshchin v monokristalakh kremniya pri svarke poluprovodnikovyykh priborov. [Formation of cracks in silicon monocrystals during welding of semiconductor devices]. *Elektronnaya tekhnika - Electrotechnik*, Vol. 1, 40-43.
17. Ghoga, L., Stepanov, V., & Shpaizman V. (1976). Khrupkoie razrushenie monokristallov kremniya [Brittle fracture of silicon monocrystals]. *Fizika i elektronika tverdogo tela. – Phisic and electronic of the solid matter*, 1, 75-81.
18. Bachin, V. (1986). *Diffusionnaya svarka stekla i keramiki s metallami [Diffusion welding of glass and ceramics with metals]*. Mashinostroenie – Machine building.

Дата першого надходження статті до видання: 08.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.11.2025

UDC 621.792.6:004.94

**Serhii Oleksiienko<sup>1</sup>, Svitlana Yushchenko<sup>2</sup>, Mykhailo Rudenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [sv.oleks@stu.cn.ua](mailto:sv.oleks@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5475-4439>

ResearcherID: F-8197-2014. SCOPUS Author ID: 57190370561

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [rasssveta@stu.cn.ua](mailto:rasssveta@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-9020>

ResearcherID: F-7741-2014. SCOPUS Author ID: 57190373626

<sup>3</sup>Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [m.rudenko@stu.cn.ua](mailto:m.rudenko@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9542-7792>

ResearcherID: G-6235-2014. SCOPUS Author ID: 57190378153

## DESIGNING OF GLASS-SILICON NODES OF PRESSURE SENSORS AND INFLUENCE OF THEIR DIMENSIONAL PARAMETERS ON FRACTURE RESISTANCE

A promising method of joining silicon with glass is the solid phase welding method that can be carried out in an air atmosphere, at low temperatures, using insignificant external compression forces and with the application of an electrostatic field of high voltage. The widespread use of the method limits a significant drawback – the instability of the quality indicators of welded joints, the main of which is mechanical strength. Primarily this is due to the imperfection of the methods for determining the welding time, during which it is possible to obtain welded joints with a given level of service properties.

The influence of the dimensional parameters of glass parts and the presence of surface conductivity in them on the course of the welding process is been determined. It is shown that the welding time required to ensure the connection of KEF-4.5/0.1 silicon with Pyrex glass along the entire contact plane is determined by the peak value of the welding current at the moment of applying the electric welding voltage. The corresponding functional dependencies have been obtained for the first time.

The influence of geometrical parameters of welded parts on strength of glass-silicon nodes is been investigated. The results of the experiments showed that with an increase in the ratio of the nominal contact area of the parts to the total perimeter of the side surfaces of the tubular glass part from 0.5 to 1.02 mm<sup>2</sup>/mm, the welding time increases.

Computer simulation of the stress state in the nodes has been carried out. It has been found that in order to improve the performance of welded glass-silicon units by reducing the level of residual stresses, they must be designed so that the ratio of the nominal contact area of the parts to the total perimeter of the side surfaces of the tubular glass part is minimal.

**Keywords:** glass; silicon; welding; designing; residual stresses; strength.

Fig.: 8. References: 18.



DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-75-81](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-75-81)

УДК 621.791.04:669.018

**Лідія Вячеславівна Петрушинець<sup>1</sup>, Юрій В'ячеславович Фальченко<sup>2</sup>,  
Валерій Анатолійович Костін<sup>3</sup>, Віктор Євгенійович Федорчук<sup>4</sup>,  
Олександр Леонідович Пузрін<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник  
відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів  
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [petrushynets@paton.kiev.ua](mailto:petrushynets@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>

ResearcherID: G-2891-2016. Scopus Author ID: 55521777800

<sup>2</sup> доктор технічних наук, завідувач відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів  
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [falchenko@paton.kiev.ua](mailto:falchenko@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>

ResearcherID: W-2793-2017. Scopus Author ID: 7801687476

<sup>3</sup> доктор технічних наук, старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів  
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

ResearcherID: KTI-6465-2024. Scopus Author ID: 7006517066

<sup>4</sup> кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник  
відділу фізико-металургійних процесів зварювання легких металів та сплавів  
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [fedorchuk@paton.kiev.ua](mailto:fedorchuk@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>

ResearcherID: W-1322-2017. Scopus Author ID: 56496648600

<sup>5</sup> молодший науковий співробітник відділу фізико-хімічних досліджень матеріалів  
Інститут електрозварювання НАН України (Київ, Україна)

E-mail: [procesor1@gmail.com](mailto:procesor1@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>

## **ВПЛИВ ЦИКЛУ ЗВАРЮВАННЯ НА ВМІСТ ФАЗОВИХ ВИДІЛЕНЬ У СПЛАВІ МА2-1**

В роботі розглянуто питання впливу параметрів зварювання та схеми пластичної деформації на розмір і розподіл фазових виділень, які утворюються в процесі дифузійного зварювання магнієвого сплаву МА2-1. Оцінку об'ємної частки й розміру фазових виділень в системі Mg-Al-Mn в магнієвому сплаві проводили у вихідному стані та після зварювання через проміжні прошарки й без них. Показано, що нагрівання сплаву МА2-1 в процесі зварювання до 420 °С призводить до суттєвого розчинення змінюючих фаз  $Mg_{17}Al_{12}$  або  $Mg_{17}(Al, Mn)_{12}$ , середні розміри часток яких до 3 разів більші при проведенні процесу в формуючих матрицях.

**Ключові слова:** магнієвий сплав МА2-1; дифузійне зварювання у вакуумі; проміжний прошарок; мікроструктура; фазові виділення системи Mg-Al-Mn.

Рис.: 6. Бібл.: 12.

**Постановка проблеми.** Магній є одним із найпоширеніших елементів у земній корі. Низька щільність сплавів на його основі (1,74 г/см<sup>3</sup>) сприяє впровадженню даної групи матеріалів в автомобільній, аерокосмічній, медичній та електронній промисловостях [1]. Проте ширше застосування Mg обмежується низькою пластичністю, високою електрохімічною активністю та складністю отримання надійних з'єднань [2]. Традиційні методи зварювання плавленням можуть призводити до розміцнення матеріалу в біляшовній зоні, формування крупнокристалічної структури, пор, оксидних включень, тріщин [3, 4]. З огляду на це перспективними є процеси зварювання у твердій фазі, зокрема дифузійне зварювання у вакуумі (ДЗВ), яке дає змогу уникнути більшості дефектів, характерних для плавлення. Водночас викликає науковий інтерес фазові зміни, які відбуваються не тільки поблизу і в зоні з'єднання, а й в основному металі під час процесу зварювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В багатьох публікаціях, присвячених дифузійному зварюванню магнієвих сплавів [5–7] акцентується увага на необхідності контролювати структурний стан вихідного матеріалу, зокрема середній розмір зерен, оскільки їх укрупнення призводить до падіння міцності. Намагання завадити росту зерна зводяться до зниження температури зварювання до 400...420 °С з одночасним суттєвим

збільшенням тривалості процесу до 60...180 хв, що є частою причиною утворення пор вздовж чіткої лінії контакту. Дослідженню можливості використання проміжних прошарків з Cu, Ag і Ni для підвищення якості з'єднань магнієвих сплавів присвячені роботи [8-10]. Автори пропонують проводити процес при суттєво вищій температурі 480...515 °С, але меншій тривалості 30...60 хв. Спільним для усіх перелічених прошарків є формування в ході ДЗВ багат шарової дифузійної зони, товщина окремих шарів якої залежить від вихідної товщини відповідної фольги та параметрів процесу. Також варто зазначити, що в усіх розглянутих роботах відмічається формування в стику крихких фаз систем Mg–Cu, Mg–Ag або Mg–Ni (рис. 1), наявність яких призводить до росту мікротвердості в зоні з'єднання та зниження міцності з'єднань.

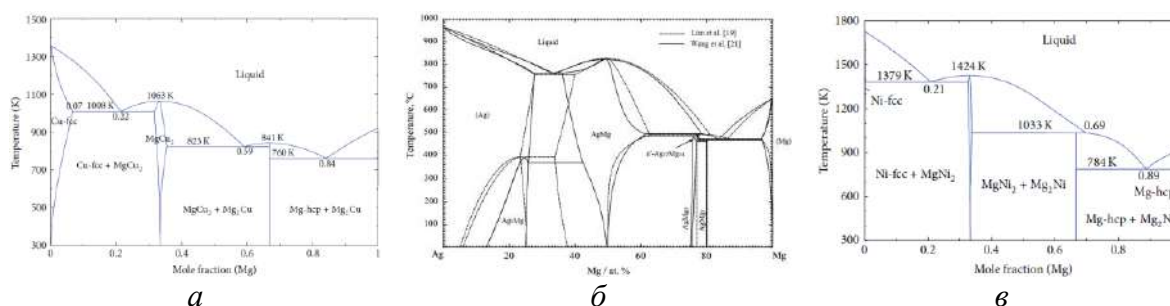


Рис. 1. Діаграми стану систем з магнієм: а – Mg–Cu, б – Mg–Ag, в – Mg–Ni [11; 12]

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** У роботах, присвячених дифузійному зварюванню магнієвих сплавів, добре описані структурні зміни, що відбуваються у стику, проте відсутня інформація щодо кількості й розмірів фазових виділень системи Mg–Al–Mn в основному металі.

**Мета дослідження.** Мета роботи – оцінити об'ємну частку й розміри фазових виділень системи Mg–Al–Mn (типу  $Mg_{17}Al_{12}$  або  $Mg_{17}(Al, Mn)_{12}$  в магнієвому сплаві МА2-1 у вихідному стані, а також після зварювання.

**Виклад основного матеріалу.** У дослідженнях були використані листи магнієвого сплаву МА2-1 (Mg – 3,8–5,0Al – 0,8–1,5Zn – 0,3–0,7Mn, % ваг.) товщиною 1,4 мм. Зварювання пластин розміром 15×10×1,4 мм проводили на установці П-115. Параметри ДЗВ задавали наступні: температура 420...560 °С, тиск 10 МПа, тривалість процесу 15...30 хв, вакуум  $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па. Оксидну плівку з контактних поверхонь зразків видаляли шляхом механічної зачистки шабером, після чого їх знежирювали в етиловому спирті. Як проміжний прошарок використовували фольгу зі сплавів міді М1 і титану ВТ1-0 товщинами по 30 мкм.

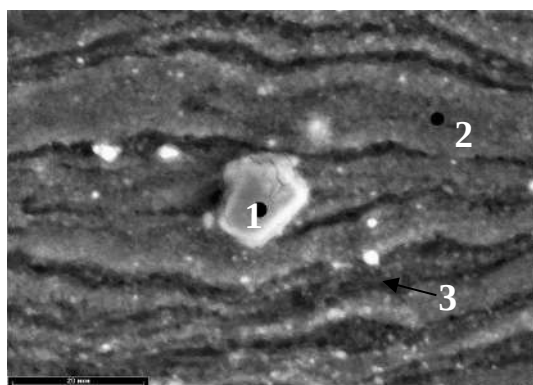
Дослідження мікроструктури зварних з'єднань проводили на поперечних шліфах на металографічному оптичному мікроскопі «Neophot-32» та скануючому електронному мікроскопу JEOL JSM-840 у режимі вторинних електронів (SEI). Електронний мікроскоп оснащено комбінованою системою енергодисперсійного мікроаналізу INCA PentaFet x3. Підготовка шліфів проводилась за стандартною методикою на високошвидкісних полірувальних кругах з використанням алмазних паст різної дисперсності. Полірування зразків проводили до 14 класу чистоти поверхні. Розмір зерна визначали лінійним методом, за допомогою окуляр-мікрометра, використовуючи від 10 до 20 полів зору.

Для визначення кількісних характеристик дисперсно-зміцнювальних фаз використовували комп'ютерну програму аналізу зображень MIPAR, яка в автоматичному режимі дозволяє визначати розміри фаз, їх розподіл, об'ємну частку та інші кількісні характеристики. Об'ємну частку фаз вимірювали безпосередньо на дослідних зразках методом площин. З використанням стандартних процедур, що було представлено у пакеті MIPAR, визначали площу, яку займає ця складова у кожному полі зору (досліджено 10 полів), а потім ділили

цю площу до загальної площі всіх ділянок, що було досліджено. З урахуванням коефіцієнта форми (відношення найбільшого до найменшого розміру для кожної фази, що була проаналізована) було визначено розподіл фаз за розміром.

За результатами мікрорентгеноспектрального аналізу було встановлено, що у вихідному матеріалі зі сплаву МА2-1 присутні фази  $Mg_{17}Al_{12}$  або  $Mg_{17}(Al,Mn)_{12}$  (рис. 2), об'ємна доля яких становить 2,124% з середнім розміром часточок 1,3108 мкм (рис. 3).

Було встановлено, що після проведення процесу зварювання за температури 560 °С протягом 15 хв в зразках, отриманих у вільному стані без проміжних прошарків, об'ємна частка фаз зменшується до 0,319 % (рис. 4). Термдеформаційний процес ДЗВ призводить до значного розчинення інтерметалідної фази  $Mg_{17}Al_{12}$  або  $Mg_{17}(Al,Mn)_{12}$  в основному металі: її вміст зменшується в ~6,7 раза. Також спостерігається зменшення середнього розміру часточок в ~1,5 раза (до 0,8756 мкм). Отримані результати дозволяють зробити висновок, що запропонований режим зварювання запускає дифузійні процеси в магнієвому сплаві, які сприяють певній гомогенізації його хімічного складу.

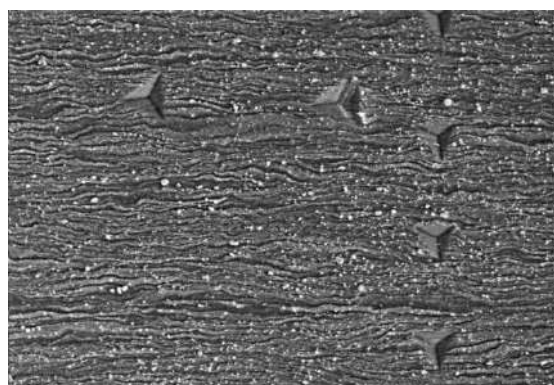


а

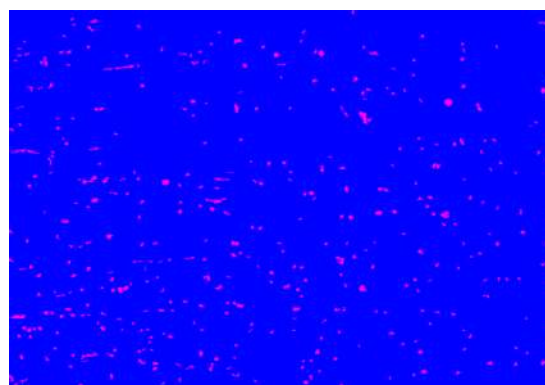
| № за/п | Вміст елементів, % ваг. |       |       |
|--------|-------------------------|-------|-------|
|        | Mg                      | Al    | Mn    |
| 1      | 16,28                   | 28,88 | 54,84 |
| 2      | 93,65                   | 5,86  | 0,49  |
| 3      | 78,95                   | 18,01 | 3,04  |

б

Рис. 2. Мікроструктура (а) і хімічний склад (б) сплаву МА2-1 у вихідному стані.



а

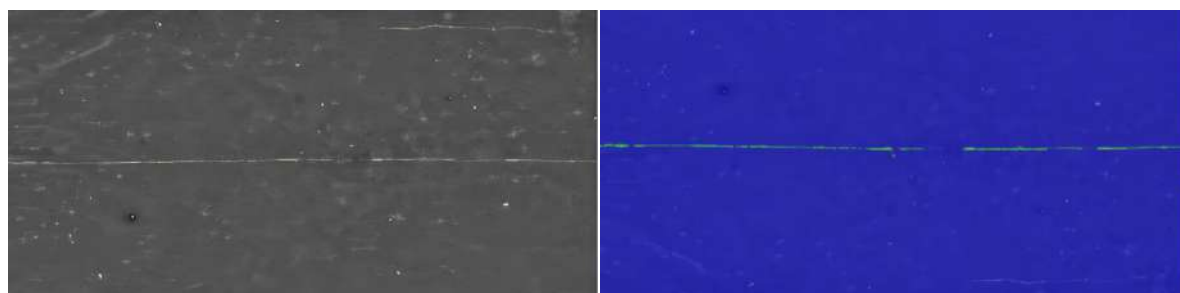


б

|                      | Матриця | Частка |
|----------------------|---------|--------|
| Об'ємна частка, %    | 97,876  | 2,124  |
| Середній розмір, мкм | 33,9067 | 1,3108 |

в

Рис. 3. Типовий вигляд сплаву МА2-1 у вихідному стані (а), відповідні бінаризовані фазові включення (б), їхні кількісні характеристики (в)

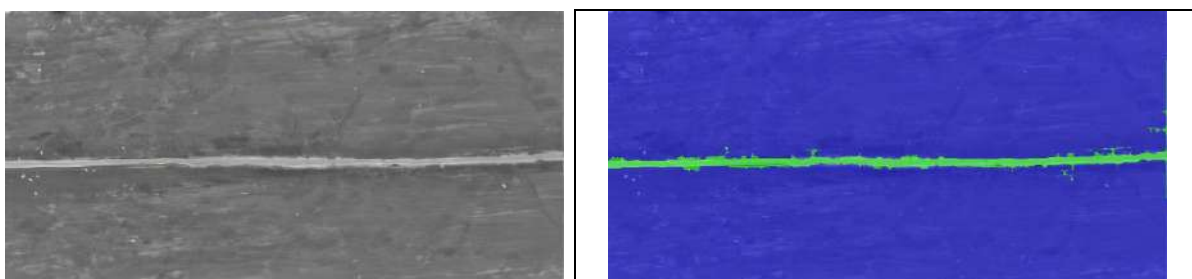


|                      | Матриця | Частка |
|----------------------|---------|--------|
| Об'ємна частка, %    | 99,968  | 0,319  |
| Середній розмір, мкм | 51,8443 | 0,8756 |

в

Рис. 4. Типовий вигляд ділянки з'єднання MA2-I + MA2-I, отриманого ДЗВ на режимі:  $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 15\text{ хв}$  (а), відповідні бінаризовані фазові включення в основному металі (б), а також їх кількісні характеристики (в)

Застосування проміжного прошарку з паралельним збільшенням тривалості процесу зварювання до 30 хв і зниженням його температури до  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  також призводить до зменшення об'ємної долі фаз і їхнього середнього розміру в основному металі, проте в меншому ступені ніж в попередньому зразку, до 0,867 % і 0,9454 мкм відповідно (рис. 5).

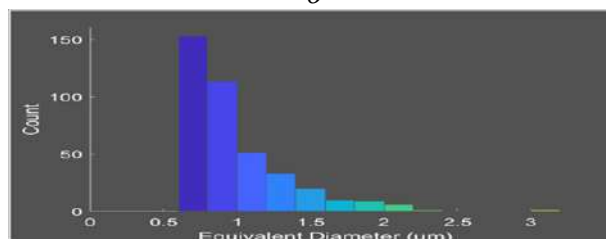


а

б

|                      | Матриця | Частка |
|----------------------|---------|--------|
| Об'ємна частка, %    | 99,913  | 0,867  |
| Середній розмір, мкм | 61,9573 | 0,9454 |

в



г

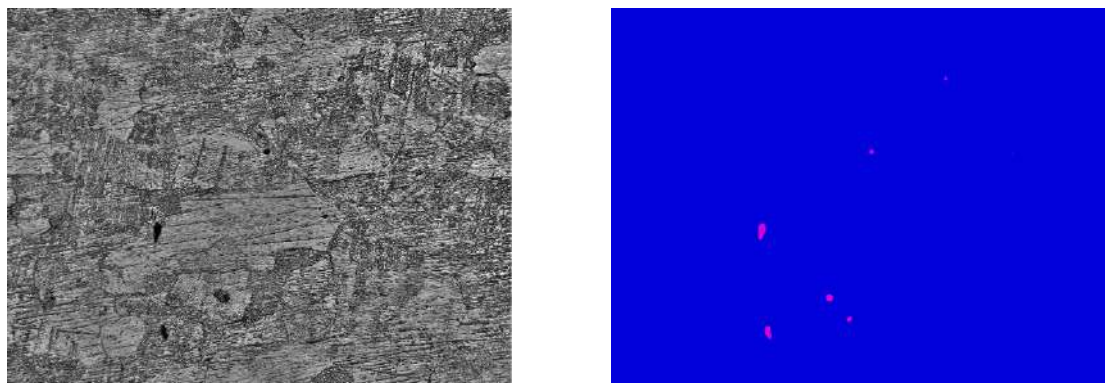
Рис. 5. Типовий вигляд ділянки з'єднання MA2-I + Cu + MA2-I, отриманого ДЗВ на режимі:  $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв}$  (а), відповідні бінаризовані фазові включення в основному металі (б), їх кількісні характеристики (в), розподіл фаз за розміром (г)

Застосування формуючих матриць, які сприяють інтенсивному деформуванню металу в зоні з'єднання призводить з одного боку до екстремального зменшення вмісту інтерметалідних фаз до 18 разів у порівнянні з вихідним матеріалом і становить 0,118 %, з іншого – до збільшення їх середнього розміру майже втричі (до 3,8558 мкм) (рис. 6).

Механізм укрупнення фаз в зоні з'єднання при використанні формуючих матриць, пов'язано з тим, що саме при цьому інтенсифікуються процеси пластичної деформації у зоні з'єднання біля прошарку. При цьому з залежності від типу матеріалу прошарку ця деформація буде різною – при м'яких матеріалах (Cu) вона буде не значною, тоді як при



використанні твердих прошарків (Ti, Ni) – навпаки суттєвою. При цьому буде підвищуватися щільність дислокацій у границі. І тоді навіть при незначній температурі буде реалізовуватися додатковий механізм дифузії – по ядрах дислокацій, який на порядок має більшу швидкість дифузії. Внаслідок цього буде зростати розмір окремих часток фаз шляхом розчинення дрібних (менше ніж 0,1 мкм) та їх наступного поглинання фазами більшого розміру. Саме це і відбувається на рис. 5.



|                      | Матриця  | Частка |
|----------------------|----------|--------|
| Об'ємна частка, %    | 99,888   | 0,118  |
| Середній розмір, мкм | 109,3767 | 3,8558 |

в

Рис. 6. Типовий вигляд ділянки з'єднання МА2-1 + Ti + МА2-1, отриманого ДЗВ у формуючих матрицях на режимі:  $T = 420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10\text{ МПа}$ ,  $t = 30\text{ хв}$  (а), виявлені програмою MIPAR бінаризовані фазові включення в основному металі (б), а також їх кількісні характеристики (в)

**Висновки.** Таким чином, можна зробити висновок, що основними факторами, які впливають на об'ємну частку дисперсно-зміцнених фаз у процесі зварювання, є температура проведення процесу ДЗВ, а також схема деформування матеріалу в стику. Так проведення зварювання при  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  сприяє зменшенню вмісту інтерметалідної фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  або  $\text{Mg}_{17}(\text{Al},\text{Mn})_{12}$  у 2,5 раза, а при збільшенні температури процесу до  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$  – у 6,6 разів у порівнянні з вихідним сплавом. Розміри часток при цьому змінюються не суттєво – зменшуються в 1,4...1,5 раза. Застосування формуючих матриць при температурі зварювання  $420\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до екстремального зменшення вмісту інтерметалідних фаз до 18 разів і збільшення їх середнього розміру майже втричі у порівнянні з вихідним матеріалом. На нашу думку, причиною цього є зростання розміру окремих часток фаз за рахунок розчинення дрібних внаслідок інтенсивної дифузії по ядрах дислокацій.

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

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

### Список використаних джерел

1. Stefano Gialanella, Alessio Malandrucolo. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer.
2. Colleen Bettles, Matthew Barnett. (2012) *Advances in wrought magnesium alloys. Fundamentals of processing, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited.

3. Min, D., Shen, J., Lai, S., Chen, J. (2009) Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*, 60(12), 1583–1590. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.09.010>.
4. Abbas, M., Khan, A., Ali, M., Kamran, M. A., Azam, K., Shakoor, A. (2014) Effect of weld current and weld speed on the microstructure and tensile properties of magnesium alloy specimens during tungsten inert gas. *Technical Journal, University of Engineering and Technology Taxila*, 19, II, 35–39.
5. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Hosokawa, Hiroyuki Watanabe, Kenji Higashi (2003) Diffusion bonding in superplastic magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 339, 328–333. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00127-2).
6. Fei Lin, Tiepeng Li, Lulu Sun, Qingsen Meng. (2012) A study on vacuum diffusion bonding of as-extruded AZ31 magnesium alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126, 10–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.10>.
7. Yu Yandong, Li Qiang (2005) Diffusion Bonding in Superplastic ZK60 Magnesium Alloy. *Materials Science Forum*, 488–489, 227–230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.227>.
8. Zhang Weixiang, Du Shuangmin (2013) Investigation into Cu-interlayered Diffusion Bonding Trial of AZ31B Alloy. *Advanced Materials Research*, 631–632, 167–171. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.167>.
9. Reza Ghavami, Ayoub Halvae, Amir Hadian (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 116519, 1–9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>.
10. Jin, Y. J., Khan, T. I. (2012) Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy. *Materials and Design*, 38, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.039>
11. Mezbahul-Islam, M., Mostafa, A.O., Medraj, M. (2014) Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data. *Journal of Materials*, 704283. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/704283>.
12. Terlicka, S., Dębski, A., Sypien, A., Gąsior, W., Budziak, A. (2021) Determination of thermo-physical and thermodynamic properties, of Ag-Mg alloys. *Materials Today Communications*, 29, 102946. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102946>.

## References

1. Stefano Gialanella, Alessio Malandrucolo. (2020) *Aerospace Alloys*. Springer.
2. Colleen Bettles, Matthew Barnett. (2012) *Advances in wrought magnesium alloys. Fundamentals of processing, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited.
3. Min, D., Shen, J., Lai, S., Chen, J. (2009) Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates. *Materials Characterization*, 60(12), 1583–1590. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.09.010>.
4. Abbas, M., Khan, A., Ali, M., Kamran, M. A., Azam, K., Shakoor, A. (2014) Effect of weld current and weld speed on the microstructure and tensile properties of magnesium alloy specimens during tungsten inert gas. *Technical Journal, University of Engineering and Technology Taxila*, 19, II, 35–39.
5. Hidetoshi Somekawa, Hiroyuki Hosokawa, Hiroyuki Watanabe, Kenji Higashi (2003) Diffusion bonding in superplastic magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 339, 328–333. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00127-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00127-2).
6. Fei Lin, Tiepeng Li, Lulu Sun, Qingsen Meng. (2012) A study on vacuum diffusion bonding of as-extruded AZ31 magnesium alloy. *Applied Mechanics and Materials*, 121–126, 10–14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.10>.
7. Yu Yandong, Li Qiang (2005) Diffusion Bonding in Superplastic ZK60 Magnesium Alloy. *Materials Science Forum*, 488–489, 227–230. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.227>.
8. Zhang Weixiang, Du Shuangmin (2013) Investigation into Cu-interlayered Diffusion Bonding Trial of AZ31B Alloy. *Advanced Materials Research*, 631–632, 167–171. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.167>.
9. Reza Ghavami, Ayoub Halvae, Amir Hadian (2019) Effect of bonding temperature on interface properties of AZ31 magnesium alloys joined by transient liquid phase using silver interlayer. *Materials Research Express*, 6, 116519, 1–9. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab44df>.

10. Jin, Y. J., Khan, T. I. (2012) Effect of bonding time on microstructure and mechanical properties of transient liquid phase bonded magnesium AZ31 alloy. *Materials and Design*, 38, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.039>

11. Mezbahul-Islam, M., Mostafa, A.O., Medraj, M. (2014) Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data. *Journal of Materials*, 704283. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/704283>.

12. Terlicka, S., Dębski, A., Sypien, A., Gąsior, W., Budziak, A. (2021) Determination of thermo-physical and thermodynamic properties, of Ag-Mg alloys. *Materials Today Communications*, 29, 102946. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102946>.

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 621.791.04:669.018

**Petrushynets Lidiia<sup>1</sup>, Falchenko Iurii<sup>2</sup>, Kostin Valeriy<sup>3</sup>,  
Fedorchuk Viktor<sup>4</sup>, Puzrin Oleksandr<sup>5</sup>**

<sup>1</sup> PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys  
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [petrushynets@paton.kiev.ua](mailto:petrushynets@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7946-3056>  
ResearcherID: G-2891-2016. Scopus Author ID: 55521777800

<sup>2</sup> Doctor in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Head of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys  
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [falchenko@paton.kiev.ua](mailto:falchenko@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>  
ResearcherID: W-2793-2017. Scopus Author ID: 7801687476

<sup>3</sup> Doctor in Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher of the Department of Physical-Chemical Studies of Materials  
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [valerykkos@gmail.com](mailto:valerykkos@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>

<sup>4</sup> PhD in Technical Sciences, Senior Researcher,  
Senior Researcher of the Department of Physical-Metallurgical Processes of Welding of Light Metals and Alloys  
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [fedorchuk@paton.kiev.ua](mailto:fedorchuk@paton.kiev.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>  
ResearcherID: W-1322-2017. Scopus Author ID: 56496648600

<sup>5</sup> Junior researcher of the Department of Physical-Chemical Studies of Materials  
Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [procesor1@gmail.com](mailto:procesor1@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>

## THE INFLUENCE OF THE WELDING CYCLE ON THE CONTENT OF PHASE PRECIPITATIONS IN THE MA2-1 ALLOY

*The low density of magnesium alloys promotes their adoption in the automotive, aerospace, medical, and electronics industries. Wider application of Mg requires the development of reliable joining methods. Vacuum diffusion welding is a promising process, as it makes it possible to avoid most of the defects characteristic of fusion welding. At the same time, scientific interest is focused on phase transformations that occur not only near and within the joint zone but also in the base material during the welding process.*

*This work examines the influence of welding parameters and the plastic deformation scheme on the size and distribution of phase precipitates formed during the thermo-deformation cycle of diffusion welding of the MA2-1 magnesium alloy. Welding of the specimens was carried out both under free conditions and with the use of forming matrices, which promote intensification of metal deformation in the joint zone. The volume fraction and size of phase precipitates of the Mg–Al–Mn system in the MA2-1 magnesium alloy were evaluated both in the initial state and after welding, with and without interlayers. To determine the quantitative characteristics of dispersion-strengthening phases, the MIPAR computer image analysis software was utilized, which enables the automatic determination of phase sizes, their distribution, volume fraction, and other quantitative parameters. The volume fraction of phases was measured directly on experimental specimens using the area method.*

*It is shown that heating the MA2-1 alloy during the welding process to 420 °C leads to significant dissolution of the strengthening phases Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> or Mg<sub>17</sub>(Al, Mn)<sub>12</sub>, whose average particle sizes are up to three times larger when the process is carried out using forming matrices. This is caused by an increase in dislocation density at grain boundaries and the activation of an additional diffusion mechanism – diffusion along dislocation cores – which promotes an increase in the size of individual phase particles due to the dissolution of fine particles (less than 0.1 μm) and their subsequent absorption by larger phases.*

**Keywords:** MA2-1 magnesium alloy; vacuum diffusion welding; interlayer; microstructure; phase precipitates of the Mg–Al–Mn system.

Fig.: 6. References: 12.

Петрушинець Л. В., Фальченко Ю. В., Костін В. А., Федорчук В. Є., Пузрін О. Л. Вплив циклу зварювання на вміст фазових виділень у сплаві МА2-1. *Технічні науки та технології*, 2025. № 4(42). С. 75–81. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-75-81](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-75-81).

**Vitalii Kolesnyk<sup>1</sup>, Oleksandr Bereznia<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences (Ph. D.), 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](mailto:v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0417-3801>

<sup>2</sup>Post-Graduate Student of the Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools.

Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [o.bereznia@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:o.bereznia@tmvi.sumdu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2275-035X>

## THERMOMECHANICAL AND TRIBOLOGICAL ASPECTS OF CUTTING MULTILAYER CFRP-TITANIUM ALLOY STACKS

*Drilling of CFRP-titanium alloy stacks is a complex technological task due to significant differences in the physical, mechanical, and thermophysical properties of carbon fiber and titanium alloy. This article presents a review of modern scientific research describing the physics of the cutting process separately for each layer of the package and comprehensively for transient processes in the contact zone of carbon fiber and titanium alloy, respectively. The features of the fracture mechanisms in the cutting zone for each of the stack materials are analyzed, and a classification of factors affecting the wear conditions and growth during the drilling process is performed. It was determined that the combination of the abrasive effect of carbon fibers significantly worsens the microgeometry and microrelief of the cutting edge, creating favorable conditions for the adhesion of titanium alloy particles to the tool surface. The combination of adhesive and abrasive wear processes significantly reduces the tool life, complicating the possibility of a thorough study of this phenomenon.*

Keywords: CFRP, titanium alloy, drilling, cutting, wear, build-up edge.

Fig.: 2. Tables: 2. References: 61.

**Relevance of the research.** Despite the significant amount of publications, the focus of existing studies on hole quality parameters, delamination and burr formation prevails. The mechanisms of wear and build-up edge formation under conditions where the tool transitions between CFRP and Ti layers are often covered fragmentarily. This limits the possibility of forming generalized, physically based ideas about the features of build-up edge formation, specifically when machining carbon fiber-reinforced plastic (CFRP)–titanium alloy stacks. Generalization of existing research will aid in understanding the direction of feature research for developing techniques to ensure the tool life of carbide twist drills when drilling holes in CFRP-Titanium alloy stacks.

**Target setting.** Currently, the problem of ensuring hole accuracy and quality when drilling CFRP-Ti alloy stacks is in the focus of research in industrial and academic societies. Physical aspects, such as the effect of cutting parameters on thrust force, torque, and hole accuracy, are studied in various aspects. However, authors suggest that there is still a lack of solid research on the topic of the effect of cutting parameters on wear and built-up edge formation. The current paper presents an analytical review of the state-of-the-art in this field to gain a more comprehensive understanding of the current state of this problem.

**Actual scientific researches and issues analysis.** In scientific publications, the issue of machining carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) is considered a distinct area that emerged at the intersection of cutting theory and fracture mechanics of anisotropic materials. Generalized information on the machinability of composites, the nature of chip formation and typical defects is given in review and reference works (Jinyang et al., 2023). Approaches to technological support for manufacturing products from composites, as well as the role of mechanical processing in forming end joints, are separately outlined (Franz et al., 2022).

Research on drilling CFRP is primarily focused on analyzing delamination as the dominant defect and determining the influence of cutting modes on the area of delamination propagation, which is estimated using appropriate criteria (Jinyang et al., 2022). Experimentally validated approaches have been proposed to reduce delamination, including optimization of feed, cutting speed, and drill geometry (Chen et al., 2023). It has been demonstrated that tool design features, including specialized cutting-edge profiles and multi-edge drills, can modify the loading condi-



tions of the reinforcing fiber layers (Jia, 2020). A separate area of research is devoted to the influence of drill geometry on axial force, chip formation, and hole quality in CFRP (Wang, 2021). One of the factors affecting the mechanics of the cutting process is the apex angle and cutting edge configuration (Peterka & Pokorny, 2014), which has been more thoroughly investigated for specialized drill designs aimed at increasing the stability of the cutting process and improving chip evacuation (Yuanxiao et al., 2024). It was found that the use of drills with multi-blade auxiliary cutting edges reduces damage to the composite layer (Shu et al., 2021).

General trends and the current state of the CFRP drilling problem for aerospace components are systematized in a review (Aamir et al., 2019). The challenges of burr formation during the processing of packages in a composite material composition and methods for their evaluation were also separately outlined (Poor et al., 2021). Currently, in the aspects of machining the CFRP layer, issues related to hole accuracy, geometric deviations, and ensuring the specified surface condition of the holes remain (Prisco et al., 2019; Soori & Arezoo, 2023).

In parallel, research on the machining of titanium alloys is developing, with thermal stress of the process and the instability of the contact interaction between the tool and the workpiece material being key considerations. Titanium alloys are widely used in aircraft structures, which improves their manufacturing technologies, particularly relevant (Martin & Evans, 2000). The cutting processes of titanium alloys are characterized by high temperatures in the contact zone and significant contact stresses, which determine the intensity of tool wear (Wong, 2008). A separate layer of work considers the influence of tool geometry on the stability and quality of holes in Ti alloys (Astakhov, 2024).

Of significant interest are studies on the mechanical processing of hybrid packages, particularly those involving CFRP/Ti. Classical works show that when drilling “composite–titanium” stacks, a complex set of defects in the composite layer and significant technological difficulties in the metal layer arise (Xu et al., 2020). Approaches to optimizing the drilling process of graphite/bismaleimide–titanium stacks are considered (Kim & Ramulu, 2004). It is also demonstrated that technological recommendations for multilayer systems necessitate a separate generalization and cannot always be applied directly from the case of homogeneous materials (Benezech et al., 2012). The state of the problem of drilling hybrid FRP/Ti-stacks is systematized in a specialized review (Xu et al., 2016). The works present an analysis of the mechanisms of material removal, the characteristics of subsurface layer damage, and the relationship between cutting modes and hole quality parameters (Xu et al., 2018). Based on orthogonal cutting, an interpretation of the material removal modes and the conditions for the formation of subsurface damage in CFRP/Ti6Al4V is proposed (Vijayathithan & Anil, 2025). The influence of cooling and lubrication methods on the process parameters and hole quality indicators in CFRP/Ti packages is also studied (Rodriguez et al., 2024).

A significant portion of the work focuses on evaluating the quality indicators of holes in CFRP/Ti packages. Geometric deviations, dimensional errors and surface condition during drilling are studied. The relationship between thermal phenomena and geometric accuracy of the hole is shown (Kolesnyk, 2020). The characteristics of the holes and the integrity of the surface layer are considered with alternative methods of obtaining holes in Ti6Al4V/CFRP hybrid systems (Li et al., 2019).

A separate area of research is devoted to the formation of burrs and interlayer defects in stacked materials. In particular, the regularities of burr formation in the interlayer region under the influence of technological conditions were described (Abdelhafeez et al., 2015). It has been demonstrated that the presence of a gap between the layers creates conditions for the growth of the interlayer burr, and the compressive force exerted by the layers affects both its height and the thickness of the burrs (Poor et al., 2021). Generalized approaches to analyzing burrs and methods for their reduction are presented in a review (Hassan et al., 2020).

The issue of tool wear when drilling CFRP/Ti stacks is considered a key factor in determining process stability. Currently, mathematical models exist, and the wear mechanisms of carbide drills during drilling CFRP/TiAl6V4 without the use of lubricating and cooling have been described. A comparative study of tool wear on a CFRP/Ti stack and on individual layers was conducted. It has been demonstrated that the wear mechanisms and their intensity vary depending on whether the material is processed as a monolithic layer or as part of a stack (Jinyang et al., 2023).

Within the framework of CFRP research, information on the use of tungsten carbides and polycrystalline diamond as tool materials for working in abrasive wear conditions has also been systematized. For the production conditions of aerospace assembly, approaches to using PCD tools when drilling critical structures are presented (An et al., 2020). Separate works compare the performance of carbide tools when drilling CFRP and CFRP/Ti stacks (Beal et al., 2011). In this context, the issue of technological selection and tool design to improve the quality of holes in multilayer systems is also highlighted (Jia, 2020).

Despite the significant volume of publications, existing studies are predominantly oriented towards the parameters of hole quality, delamination, and burr formation. The mechanisms of wear and build-up formation in the conditions of the tool transition between layers of CFRP and titanium alloy are often covered fragmentarily. This limits the possibility of forming generalized physically based ideas about the features of build-up edge formation specifically when machining CFRP/Ti alloy stacks.

#### **The statement of basic materials. Physics of CFRP cutting**

The machining of CFRP is characterized by the complex physics of the cutting process, which is due to the anisotropic structure of the material and the presence of reinforcing fibers, whose properties differ significantly from those of the polymer matrix. CFRP is a multiphase composite material in which the load-bearing function is mainly implemented by reinforcing fibers, while the matrix acts as a binding medium. The physical mechanisms of material failure during the cutting of CFRP differ significantly from those characteristic of isotropic metals. Plastic deformation of the material in the cutting zone is practically absent, and material removal occurs primarily through the brittle fracture of the fibers and local displacement of the polymer matrix. Depending on the fiber orientation relative to the cutting direction, various mechanisms for cutting, breaking, or pulling out the fibers can be implemented (Hassan et al., 2022). This aspect is one of the determining factors affecting the nature of the force interaction between the tool and the material. When cutting along the fibers, increased process stability is observed, while cutting at an angle or across the fibers is accompanied by uneven destruction and increased fluctuations in cutting forces, which is due to the complex nature of the cutting edge loading and the instability of the contact interaction (Alvarez-Alcon et al., 2020).

An essential feature of the physics of the cutting CFRP is the intense abrasive effect of reinforcing fibers on the cutting tool. Carbon fibers have a high specific hardness and can cause micro-cutting of the contact surfaces of the tool. As a result, abrasive wear becomes the dominant mechanism of cutting-edge degradation already at the initial stages of drilling (Zhang, 2022). Abrasive wear is accompanied by a change in the microgeometry of the cutting edge, in particular, an increase in its cutting edge radius. This leads to a change in the conditions of tool entry into the material, a redistribution of contact stresses, and an increase in specific cutting forces. These phenomena are especially evident when machining multilayer laminates, where the cutting edge sequentially interacts with fibers of different orientations (Balan et al., 2021).

Thermal processes during the cutting of carbon fiber composites have a specific nature. The low thermal conductivity of the polymer matrix and the absence of intense plastic deformation result in limited heat release in the cutting zone compared to metals. At the same time,

a local increase in temperature can lead to thermal softening or degradation of the matrix. Such phenomena negatively affect the surface quality of the holes and can contribute to the formation of defects in the surface layers (Poor et al., 2021).

Cutting parameters have a significant impact on the nature of physical processes during the machining of CFRP. Increasing the cutting speed, as a rule, helps to reduce cutting forces, but can lead to an increase in temperature in the plastic deformation zone. The feed directly affects the intensity of the load on the laminate layers and the conditions under which they are destroyed. In this regard, optimizing cutting modes is a key area for ensuring process stability (John et al., 2022).

The geometry of the cutting tool has a significant impact on the physics of the CFRP cutting process. Cutting tool angles, the shape of the cutting edge and the configuration of the chip removal grooves determine the nature of the contact with the fibers and the conditions for chip removal (Jia et al., 2020). Specialized tool geometries can partially reduce the intensity of abrasive wear and improve the quality of the machined surfaces (Priarone, 2017).

Given the numerous factors and aspects that influence the mechanics of the cutting process, it is advisable to summarize the leading research in this area (Table 1).

*Table 1 – The analysis of the cutting process aspect of the mechanics of CFRP destruction*

| Reference                | Topic                                                                                                                                                                                             | Conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Yu et al., 2023)        | Thermomechanical damage during drilling of CFRP. The influence of the cutting-edge condition on the mechanism of carbon fiber fracture during CFRP drilling.                                      | It was found that the heat distribution from the cutting zone is uneven, leading to heat accumulation, reduced fiber-matrix adhesion, and brittle fracture of the carbon fibers. The increase in tool wear exacerbates the abrasive-brittle nature of fiber fracture, intensifying the damage to carbon fibers.                                                                                                                   |
| (Arjun et al., 2022)     | The mechanism of material removal during milling of unidirectional carbon fiber, taking into account fiber orientation and heat release.                                                          | The destruction of carbon fiber occurs through brittle fracture of the fibers. Effective cooling and lubrication reduce friction, lower the temperature, and improve the quality of the machined surface.                                                                                                                                                                                                                         |
| (Chaosheng et al., 2024) | The effect of spiral drilling on the force and thermal characteristics of cutting carbon fiber. The effect of step drill geometry and cyclic drilling on the failure mechanism of CFRP in stacks. | Cutting against the direction of the fibers is accompanied by increased forces and more intense defect formation; the optimal strategy is to reduce temperature and damage. The use of step drills helps to reduce axial force and reduce delamination in CFRP.                                                                                                                                                                   |
| (Shariar et al., 2025)   | Contact stresses and thermal effects in the tool–CFRP interface. Systematization of the physical mechanisms of cutting CFRP in stacks with metals                                                 | Excessive cutting temperature leads to “glassing” of the polymer matrix, changes the contact mechanics, and increases the risk of delamination, thereby deteriorating the quality of the holes. A combination of brittle fracture of the fibers, thermal destruction of the matrix, and contact stresses in the zone of connection between the carbon fiber layer and the metal determines the physics of cutting CFRP in stacks. |
| (Chealvan et al., 2022)  | Numerical modeling of the effect of temperature on damage to carbon fiber in multilayer stacks                                                                                                    | Heat accumulation in carbon fiber accelerates thermal degradation of the matrix and promotes the spread of delamination of the lower layers of CFRP.                                                                                                                                                                                                                                                                              |

Summarizing the research results in this chapter, it can be concluded that the physics of the carbon fiber cutting process is determined by a combination of a brittle fracture mechanism of the material and an intense abrasive interaction between the reinforcing fibers and the cutting tool. It is these features that shape the state of the cutting edge after passing through the composite layer, which is of fundamental importance for the subsequent interaction of the tool with the titanium alloy in multilayer stacks.

### Physics of Ti alloy cutting

Machining of titanium alloys is characterized by high process complexity, which is due to the combination of high material strength, low thermal conductivity and increased chemical activity of titanium. This combination of properties leads to the formation of a stress-strain state with localization of plastic deformation in a narrow shear zone (Geng et al., 2020). During the cutting of titanium alloys, the majority of the mechanical energy is converted into heat in the tool-workpiece contact zone. Due to the low thermal conductivity of titanium, heat removal into the material volume is limited, which contributes to an increase in temperature in the cutting zone (Kolesnyk, 2020). Increased temperatures significantly impact contact processes and the wear intensity of the cutting tool (Wang & Jia, 2021).

When cutting titanium alloys, the formation of segmental or chipping chips is usually observed (Fu et al., 2022). The nature of chip formation is due to the cyclic accumulation of plastic deformation, followed by local rupture (John et al., 2022). As a result, fluctuations in cutting forces and process instability are observed, which negatively affect the quality of the machined surfaces.

High contact stresses and temperatures in the cutting zone create favorable conditions for adhesive interaction between the titanium alloy and the tool material. Particles of the machined material stick to the cutting edge, forming a build-up edge. The formation of the build-up changes the geometry of the cutting wedge, friction conditions and the direction of chip convergence (Chowdhury et al., 2017). The build-up edge formation process is unstable and is accompanied by its periodic destruction. The detachment of parts of the build-up can lead to microcracks of the cutting edge and additional intensification of tool wear. As a result, the condition of the cutting tool gradually deteriorates and the stability of the cutting process decreases (Astakhov & Shvets, 2020).

Tool wear during cutting of titanium alloys is complex. Along with adhesive wear, diffusion processes and thermal softening of the tool material occur in the contact zone. The combined effect of these mechanisms determines the wear intensity and tool life (Beal et al., 2011).

The geometry of the cutting tool has a significant impact on the physics of the cutting process for titanium alloys. The leading and trailing angles, as well as the leading angle and the helix angle, have a significant impact, determining the conditions for chip formation and the nature of the contact interaction (Astakhov, 2024). Geometry optimization enables the reduction of temperature load and partial stabilization of the cutting process (Li et al., 2023).

Cutting parameters also play a crucial role in determining the cutting conditions of titanium alloys. Increasing the cutting speed typically increases temperature in the contact zone, whereas increasing the feed rate affects the magnitude of the contact stresses. The choice of cutting modes is a compromise between process performance and cutting tool stability (An et al., 2020).

Summarizing the research results, it is notable that the physics of the cutting process of titanium alloys is determined by the interaction of thermomechanical and adhesive factors (Table 2).

*Table 2 – Analysis of key research in machining Ti alloy*

| Reference               | Topic addressed                                                                                                                            | Key conclusions                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                       | 2                                                                                                                                          | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| (Hiremath et al., 2025) | The influence of thermal and adhesive phenomena on chip formation, cutting forces and surface quality during drilling and helical milling. | Lower axial force values are associated with helical milling due to its kinematics and significantly lower temperatures in the cutting zone, which reduces the risk of thermal damage and decreases the intensity of wear/adhesion. The machining process can be accompanied by riveting of the machined surface and is characterized by the formation of short, fragmented chips, which contribute to process stability and quality. |

*End of the table 2*

| 1                       | 2                                                                                                                                                                                                    | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (Zhu et al., 2025)      | Influence of the use of minimal lubrication (MQL) techniques on cutting temperature, wear, adhesion and process stability during drilling of titanium alloy                                          | The increase in cutting-edge temperature is a key factor in the intensification of wear and adhesion phenomena during the drilling of titanium alloys. MQL reduces the thermal load, resulting in slower degradation of the cutting edge compared to cutting without coolant. The results highlight the crucial role of heat removal from the cutting zone in determining tool life during the machining of titanium alloys.                                                                                                       |
| (Yang et al., 2025)     | The effect of cryogenic cooling technique on cutting temperature, cutting forces, and thermomechanical damage of the surface layer of holes in titanium alloys.                                      | Cryogenic cooling changes the thermomechanical balance of the cutting process of titanium alloys. As a result of the differences in cutting forces, conditions for the formation of residual stresses and hardening are created. It is shown that the state of the machined surface for titanium is a function of the temperature in the cutting zone.                                                                                                                                                                             |
| (Shixiong et al., 2025) | Systematization of cause-and-effect relationships between heat generation, adhesion/build-up, wear, plastic deformation and quality indicators of the machined surface when cutting titanium alloys. | The review summarizes that the low thermal conductivity and chemical activity of titanium enhance the influence of local heat generation and adhesion, which leads to build-up formation and accelerated wear of the cutting tool. These phenomena directly affect the roughness, depth of the defect layer and residual stresses. It is demonstrated that optimizing surface quality indicators requires simultaneous control of the contact interaction between the tool and the workpiece, as well as the thermal cooling mode. |
| (Debard et al., 2025)   | Burr formation mechanisms when drilling Ti-6Al-4V under the influence of thermomechanical conditions and the state of the cutting edge.                                                              | Burr formation in Ti-6Al-4V is a result of a combination of plastic deformation at the exit, high cutting temperature, and cutting edge wear.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

The formation of a built-up edge is a key manifestation of this interaction, significantly affecting the stability of the process and tool wear. These features are of particular importance in the machining of multilayer stacks, where the previous interaction with the composite material layer additionally determines the state of the cutting edge.

### **Physics of cutting CFRP/titanium alloy stacks**

Fundamentally more complex cutting conditions characterize the machining of multilayer CFRP/titanium alloy stacks compared to machining homogeneous materials. This is due to the sequential interaction of the cutting tool with layers that differ significantly in mechanical, thermophysical, and tribological properties (Franz et al., 2022; Xu et al., 2023). During the cutting process, the tool initially interacts with the composite layer, which is characterized by a brittle fracture mechanism and the intense abrasive action of the reinforcing fibers. As a result, the cutting edge becomes blunt and its microgeometry changes. The state of the cutting edge directly affects the subsequent interaction of the tool with the titanium layer (Chowdhury et al., 2017). A sharp change in cutting conditions occurs as the cutting tool transitions through the material boundary. The change in the mechanism of material destruction, the nature of contact interaction and heat generation creates unstable operating conditions for the tool. At the layer boundary, the superposition of abrasive and adhesive wear mechanisms is observed (Alonso et al., 2019). In the titanium layer, cutting occurs under conditions of increased contact stresses and temperatures, which are formed by considering the previous abrasive wear of the cutting edge. Blunting of the tool after cutting carbon fiber plastic results in an increase in the contact area and intensification of the adhesive interaction between the tool and the titanium alloy, creating favorable conditions for growth (Alvarez et al., 2011). A feature of package cutting is that the formation of growth does not occur under the “classical” conditions characteristic of cutting solid titanium alloys. The initial state of the cutting edge, changed by the abrasive action

of the composite layer, determines the morphology of the growth and the nature of its interaction with the tool (Luo et al., 2019).

A vital zone from the point of view of process physics is the boundary between the composite and metal layers. It is here that the maximum instability of cutting forces and an increase in cutting temperature are observed. Fluctuations in forces and temperature negatively impact the state of the cutting edge, contributing to the intensification of tool wear (Chen et al., 2025). The physics of cutting stacks is also influenced by the technological parameters of the process, specifically cutting speed, feed and cooling conditions. These factors affect the processes in the composite and titanium layers differently. Optimal modes for one material do not always ensure process stability when processing a package in a different material. This complicates the choice of technological parameters and requires compromise solutions (Fig. 1, Fig. 2) (Xu et al., 2023).

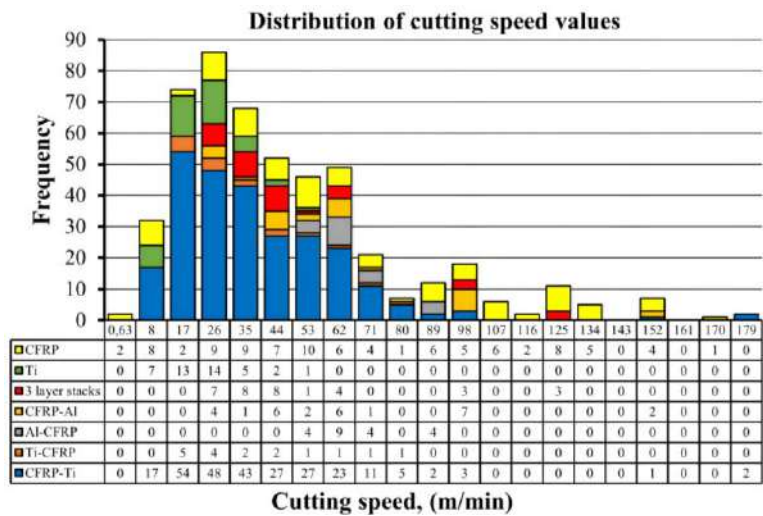


Fig. 1. Cutting speed distribution diagram depending on the stacks sequence (Xu et al., 2023)

The cutting direction and the sequence of layers have a significant impact on the physics of the cutting process. In the case of drilling, when the tool sequentially processes the composite material and then the titanium alloy, the effect of preliminary wear of the cutting edge is most pronounced. These features must be considered when analyzing the wear and build-up processes (An et al., 2020).

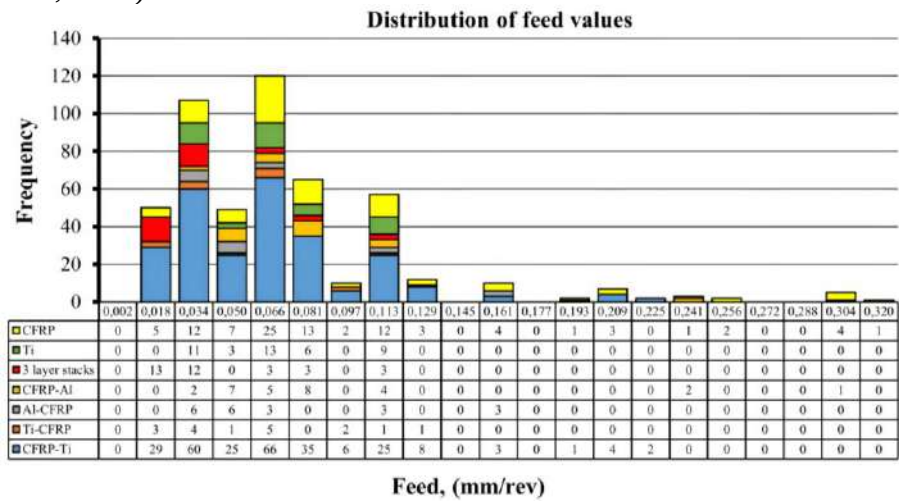


Fig. 2. Feed rate diagram depending on stack sequence (Xu et al., 2023)

Summarizing the results presented, it can be noted that the physics of cutting the “carbon fiber-titanium alloy” packages is determined by the combined action of abrasive and adhesive mechanisms, as well as the instability of thermomechanical conditions in the material interface zone. Such conditions form a specific nature of the cutting tool wear and create prerequisites for the features of build-up edge formation that differ from the processes characteristic of cutting homogeneous materials.

### **Wear mechanics and build-up edge formation**

The wear of the cutting tool during the mechanical processing of a CFRP/titanium alloy stack is complex and multifactorial, due to the sequential interaction of the tool with layers of materials that differ significantly in mechanical and tribological properties. In the composite layer, the dominant mechanism influencing the cutting edge is abrasive wear caused by the action of rigid reinforcing fibers. The abrasive action of the fibers leads to a gradual blunting of the cutting edge and a change in its microgeometry. The change in the microgeometry of the cutting tool will manifest itself in an increase in the radius of the cutting edge, which quickly and significantly alters the conditions of interaction between the tool and the processed material. Thus, the cutting of the titanium layer of the package occurs with a tool that is already somewhat blunted, initially forming more unfavorable conditions for cutting the titanium alloy (Aydin & Nalbant, 2020). Two primary wear mechanisms accompany the machining of titanium alloys. Adhesive and thermomechanical wear are dominant, which are caused by high contact stresses on the cutting edge due to the high strength of the titanium alloy and increased cutting temperature, contributing to the adhesion of particles of the processed material to the cutting edge (Sharma et al., 2025).

A characteristic consequence of the combination of high contact stresses, low thermal conductivity, and high chemical activity in the cutting zone when drilling carbon fiber-titanium alloy packages is the formation of growth on the cutting edge of the drill (Chowdhury et al., 2017; Zhu et al., 2025). The combination of the conditions described above, in particular high cutting temperature and low thermal conductivity, leads to the fact that a significant part of the energy in the zone of plastic deformation is converted into heat, which, in combination with the chemical activity of the titanium alloy, leads to the adhesive transfer of its particles to the cutting edge of the tool. The unstable nature of the growth as a phenomenon leads to a cyclic process of growth formation and detachment, which significantly worsens the microgeometry of the drill for the next drilling cycle (Oliaei & Karpat, 2017; Salguero et al., 2011).

In addition to the conditions directly in the cutting zone, the formation of growth is influenced by the conditions of the strip removal from the cutting zone, as it worsens the thermodynamic conditions of the drilling process. Thus, preventing the formation of growth is an essential technological task in the processing of packages consisting of carbon fiber-titanium alloy. To date, two main directions for preventing growth using minimal lubrication (MQL) and cryogenic technologies have emerged (Yang et al., 2025; Zhu et al., 2025). The use of combined cooling schemes, which combine LCO<sub>2</sub> and MQL cooling, improves chip removal and reduces the intensity of adhesive transfer in titanium alloys (Rodriguez et al., 2024).

The mechanics of wear and built-up edge formation during the machining CFRP/Ti alloy stacks are attributed to the combined effects of the abrasive action of carbon fibers, high cutting temperatures, and the high chemical activity of the titanium alloy under conditions of high contact loads. The consensus in scientific publications regarding the problematic nature of studying the impact of growth on the drilling process due to the abrasive effect of carbon fiber makes this aspect of the physics of cutting composite materials a relatively understudied area. Thus, further research aimed at a systematic analysis of wear mechanisms and build-up edge formation during drilling of CFRP/Ti alloy stacks is advisable.

### Conclusions.

1. Machining CFRP/ Ti alloy stacks is characterized by more complex cutting conditions compared to the machining of homogeneous materials, due to significant differences in the physical, mechanical, and thermophysical properties of the layers of the stacks.

2. The physics of the cutting process of carbon fiber is characterized by a combination of brittle fracture of the fiber-matrix bond material and intense abrasive action of the fibers, which intensifies the wear process of the cutting edge of the drill due to the deterioration of its micro-geometry.

3. The physics of the cutting process of titanium alloys is characterized by a combination of thermomechanical and thermochemical factors that contribute to the built-up edge formation and can cause detachment of sections of the cutting edge during its separation, which significantly worsens the operating conditions of the tool and reduces its tool life.

4. It was determined that the mechanics of cutting tool wear during package processing is complex and cannot be reduced to the sum of wear mechanism factors typical for cutting carbon fiber and titanium alloys, since it has a stochastic, non-linear nature.

5. The generalization of the review results showed insufficient research into the processes of build-up formation during drilling of CFRP/ Ti alloy stack, which limits the possibilities of creating physically based models of tool wear and substantiating rational technological parameters.

### Acknowledgments

This research was supported by the Slovak research project “Research into Innovative, Unconventional Methods of Preparation of Cutting Edge Microgeometry to Increase the Tool Life of Cutting Tools” (VEGA 1/0266/23). The current paper was prepared during a research stay within the framework of the National Scholarship Program of the Slovak Republic (NSP SAIA). The article was prepared with the assistance and technical support of the non-government organization “INDUSTRY 5.UA”.

### Statement on the use of generative AI and AI-based technologies in the process of writing the text of the article

During the writing of this material, the authors used ChatGPT to check English grammar and to write an extended annotation. After using this tool/service, the authors reviewed and edited the content and take full responsibility for the content of the publication.

### References

1. Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., & Nosrati, A. (2019). Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), 2289-2308. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z>
2. Abdelhafeez, A. M., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Dowson, A., & Arnold, D. (2015). Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys. *Cirpe 2015 - Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing*, 37, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.019>
3. Alonso, U., Calamaz, M., Girot, F., & Iriondo, E. (2019). Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 356-370. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.006>
4. Alvarez, M., Salguero, J., Sanchez, J. A., Huerta, M., & Marcos, M. (2011). SEM and EDS Characterisation of Layering TiOx Growth onto the Cutting Tool Surface in Hard Drilling Processes of Ti-Al-V Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2011, 10, Article 414868. <https://doi.org/10.1155/2011/414868>
5. Alvarez-Alcon, M., de Lacalle, L. N. L., & Fernandez-Zacarias, F. (2020). Multiple Sensor Monitoring of CFRP Drilling to Define Cutting Parameters Sensitivity on Surface Roughness, Cylindricity and Diameter. *Materials*, 13(12), 17, Article 2796. <https://doi.org/10.3390/ma13122796>



6. An, Q. L., Dang, J. Q., Li, J. L., Wang, C. Y., & Chen, M. (2020). Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences. *Composite Structures*, 253, 13, 112794. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112794>
7. Arjun, N., Alper, U., Suhasini, G., & Jawahir, I. S. (2022). Analysis of surface integrity in drilling carbon fiber reinforced polymer composite material under various cooling/lubricating conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 124-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.065>
8. Astakhov, V. P. (2024). *High-productivity drilling tools: Design and geometry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003263296>
9. Astakhov, V. P., & Shvets, S. V. (2020). Technical Resource of the Cutting Wedge is the Foundation of the Machining Regime Determination. *International Journal of Manufacturing Materials and Mechanical Engineering*, 10(2), 1-17. <https://doi.org/10.4018/ijmmme.2020040101>
10. Aydin, E., & Nalbant, M. (2020). The effect of drill point angles on drillability in CFRP/Al-7075 stacking drilling. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 917-931. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.548419>
11. Balan, A. S. S., Kannan, C., Jain, K., Chakraborty, S., Joshi, S., Rawat, K.,...Thakur, V. K. (2021). Numerical Modelling and Analytical Comparison of Delamination during Cryogenic Drilling of CFRP. *Polymers*, 13(22), 15, 3995. <https://doi.org/10.3390/polym13223995>
12. Beal, A., Kim, D., Park, K. H., Kwon, P., & Asme. (2011). A comparative study of carbide tools in drilling of cfrp and cfrp-ti stacks. *Proceedings of the Asme International Manufacturing Science and Engineering Conference 2011*, 1, 145-+.
13. Benezech, L., Landon, Y., & Rubio, W. (2012). Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling. In M. Karama (Ed.), *Innovating Processes* 423, 1-11. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.423.1>
14. Chaosheng, L., Niancong, L., Lei, C., Wuyu, C., Yanzong, L., & Miaoke, Z. (2024). Analysis of the effects of different milling strategies on helical milling of unidirectional CFRP under minimum quantity lubrication. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.072>
15. Chealvan, S. H., Krishnaraj, V., & Abd Rahim, E. (2022). High speed cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under high pressure coolant conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 236(12), 1633-1642, Article 09544054221080025. <https://doi.org/10.1177/09544054221080025>
16. Chen, C., Zhao, Q., Wang, A., Zhang, J., Qu, Q., & Shi, Z. (2023). Numerical Study of Step Drill Structure on Machining Damage in Drilling of CFRP/Ti Stacks. *Materials*, 16, 6039. <https://doi.org/10.3390/ma16176039>
17. Chen, J., Zhang, X., Xue, Z., Yan, Y., Fan, X., An, Q.,...Ko, T. J. (2025). Multi-material stage-specific analysis and WSTVF based feature engineering for enhanced tool wear monitoring in CFRP/Ti stacks drilling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 234, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112829>
18. Chowdhury, M. S. I., Chowdhury, S., Yamamoto, K., Beake, B. D., Bose, B., Elfizy, A.,...Veldhuis, S. C. (2017). Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation. *Surface & Coatings Technology*, 313, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.115>
19. Debar, B., Rey, P. A., & Cherif, M. (2025). Investigation of burr formation in Ti-6Al-4V drilling. *Journal of Manufacturing Processes*, 142, 482-493. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.03.108>
20. Franz, G., Vantomme, P., & Hassan, M. H. (2022). A Review on Drilling of Multilayer Fiber-Reinforced Polymer Composites and Aluminum Stacks: Optimization of Strategies for Improving the Drilling Performance of Aerospace Assemblies. *Fibers*, 10, 78. <https://doi.org/10.3390/fib10090078>
21. Fu, Q., Wu, S. J., Li, C. H., Xu, J. Y., & Wang, D. Z. (2022). Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.015>
22. Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Zhang, M., Jiang, X., & Zhang, D. (2020). Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 183, 12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107698>

- 23.Hassan, A. A., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Arnold, D., & Dowson, A. (2020). An analytical model to predict interlayer burr size following drilling of CFRP-metallic stack assemblies. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 69(1), 109-112. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.038>
- 24.Hassan, M. H., Abdullah, J., & Franz, G. (2022). Multi-Objective Optimization in Single-Shot Drilling of CFRP/Al Stacks Using Customized Twist Drill. *Materials*, 15(5), 25, Article 1981. <https://doi.org/10.3390/ma15051981>
- 25.Hiremath, A., Malghan, R. L., Bolar, G., & Polishetty, A. (2025). Comprehensive machinability assessment of Ti6Al4V alloy during drilling and helical milling using sustainable dry condition. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19, 1987-2002. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01964-2>
- 26.Jia. (2020). Multi-margin drill structure for improving hole quality and dimensional consistency in drilling Ti/CFRP stacks. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 9.
- 27.Jia, Z. Y., Chen, C., Wang, F. J., Zhang, C., & Wang, Q. (2020). Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11-12), 5099-5109. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05029-y>
- 28.Jinyang, X., Norbert, G., Jiaxin, S., Vijayan, K., & Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9677-9707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>
- 29.Jinyang, X., Youkang, Y., Davim, J. P., Linfeng, L., Min, J., Norbert, G., & Ming, C. (2022). A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites. *Composite Structures*, 294, 115594. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115594>
- 30.John, K. M., Thirumalai Kumaran, S., Kurniawan, R., & Ahmed, F. (2022). Evaluation of thrust force and delamination in drilling of CFRP by using
- 31.active spring restoring backup force. *Materials Today: Proceedings*, 49(2), 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.033>
- 32.Kim, D., & Ramulu, M. (2004). Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. *Composite Structures*, 63(1), 101-114. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(03\)00137-5](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(03)00137-5)
- 33.Kolesnyk. (2020). Experimental study of drilling temperature, geometrical errors and thermal expansion of drill on hole accuracy when drilling CFRP/Ti alloy stacks. *Materials*, 13(14), 17.
- 34.Li, E. M., Zhou, J. T., Yang, C. S., Zhao, J. H., Li, Z. Y., Zhang, S. S., & Wang, M. W. (2023). Part machining deformation prediction based on spatial-temporal correlation learning of geometry and cutting loads. *Journal of Manufacturing Processes*, 92, 397-411. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.042>
- 35.Li, M. J., Huang, M. J., Chen, Y. W., Kai, W., & Yang, X. J. (2019). Experimental study on hole characteristics and surface integrity following abrasive waterjet drilling of Ti6Al4V/CFRP hybrid stacks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 4779-4789. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04334-5>
- 36.Luo, B., Zhang, K. F., Liu, S. N., Cheng, H., & Wang, R. X. (2019). Investigation on the interface damage in drilling low-stiffness CFRP/Ti stacks *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(9), 2211-2221. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.04.017>
- 37.Martin, R., & Evans, D. (2000). Reducing costs in aircraft: The metals affordability initiative consortium. *JOM*, 52, 24-28.
- 38.Oliaei, S. N. B., & Karpat, Y. (2017). Investigating the influence of friction conditions on finite element simulation of microscale machining with the presence of built-up edge. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 819-829. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9456-9>
- 39.Peterka, J., & Pokorny, P. (2014). Influence of the Lead Angle from the Vertical Axis Milling on Effective Radius of the Cutter. *Precision Machining Vii*, 581, 44-49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.44>
- 40.Poor, D. I., Geier, N., Pereszlai, C., & Xu, J. Y. (2021). A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges. *Composites Part B-Engineering*, 223, 17, 109155. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>
- 41.Priarone. (2017). Diamond drilling of carbon fiber reinforced polymers: Influence of tool grit

size and process parameters on workpiece delamination. *Procedia CIRP*, 66, 181-186.

42. Prisco, U., Impero, F., & Rubino, F. (2019). Peck drilling of CFRP/titanium stacks: effect of tool wear on hole dimensional and geometrical accuracy. *Production Engineering-Research and Development*, 13(5), 529-538. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00915-1>

43. Rodriguez, I., Arrazola, P. J., Cuesta, M., & Pušavec, F. (2024). Hole quality improvement in CFRP/Ti6Al4V stacks using optimised flow rates for LCO2 and MQL sustainable cooling/lubrication. *Composite Structures*, 329, 117687. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117687>

44. Salguero, J., Batista, M., Sanchez, J. A., & Marcos, M. (2011). An XPS Study of the Stratified Built-Up Layers Developed onto the Tool Surface in the Dry Drilling of Ti Alloys. *Modelling of Machining Operations*, 223, 564-+. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.564>

45. Shariar, F., Karagüzel, U., & Karpat, Y. (2025). A hybrid model to analyze stress distributions at the tool and workpiece interface during drilling of thick CFRP laminates considering thermal effects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15717-2>

46. Sharma, P., Mishra, S. K., & Ramkumar, J. (2025). Damage mechanisms and wear progression of advanced AlTiSiN coatings deposited on WC/Co cemented carbide cutting tools for machining under cryogenic conditions. *CERAMICS INTERNATIONAL*, 51(27), 54530-54548. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.183>

47. Shixiong, W. U., Xiaojian, M. E. I., Yimin, L. I. N., Xiaowei, Z., Chengyong, W., & Chaolin, T. A. N. (2025). Surface integrity in titanium alloy cutting: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103903>

48. Shu, L. M., Li, S. H., Fang, Z. L., Kizaki, T., Kimura, K., Arai, G.,... Sugita, N. (2021). Study on dedicated drill bit design for carbon fiber reinforced polymer drilling with improved cutting mechanism. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 142, 17, Article 106259. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106259>

49. Soori, M., & Arezoo, B. (2023). Dimensional, geometrical, thermal and tool deflection errors compensation in 5-Axis CNC milling operations. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1080/14484846.2023.2195149>

50. Vijayathithan, M., & Anil, M. (2025). Predictive modelling of tool wear in CFRP drilling using acoustic emission sensors under dry and cryogenic conditions. *Wear*, 570, 205930. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205930>

51. Wang. (2021). Novel chip-breaking structure of step drill for drilling damage reduction on CFRP/Al stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 9.

52. Wang, Q., & Jia, X. L. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(11-12), 3487-3502. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>

53. Wong, F. R. (2008). Effect of drill geometry of uncoated tool when drilling titanium alloy Ti-6Al-4V (Master's thesis). In.

54. Xu, J. Y., Ji, M., Davim, J. P., Chen, M., El Mansori, M., & Krishnaraj, V. (2020). Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures*, 234, 13, Article 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>

55. Xu, J. Y., Kolesnyk, V., Li, C. P., Lysenko, B., Peterka, J., & Gupta, M. K. (2023). A critical review addressing conventional twist drilling mechanisms and quality of CFRP/Ti stacks. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, 24, 6614-6651. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.226>

56. Xu, J. Y., Li, C., El Mansori, M., Liu, G. Y., & Chen, M. (2018). Study on the Frictional Heat at Tool-Work Interface when Drilling CFRP Composites. *46th Sme North American Manufacturing Research Conference, Namrc 46*, 26, 415-423. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.049>

57. Xu, J. Y., Mkaddem, A., & El Mansori, M. (2016). Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review. *Composite Structures*, 135, 316-338. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>

58. Yang, D., Liu, G., & Li, X. (2025). Cryogenic Temperature-Dependent Machining Forces and

Surface Integrity of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.202502270>

59. Yu, J. J., Pan, Z. X., Ye, W., Li, Q. C., & Wu, Z. Y. (2023). Dynamic temperature field and drilling damage mechanism of plain woven carbon/glass hybrid composites. *COMPOSITE STRUCTURES*, 304, 116375, Article 116375. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116375>

60. Yuanxiao, L., Feng, J., Ziqiang, Z., Xue, W., & Ying, N. (2024). A prediction model for drilling temperature of CFRP/Ti stacks and green cooling strategy considering chip ejection process. *Journal of Materials Processing Tech.*, 329, 118424. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118424>

61. Zhang. (2022). Effect of embedded delamination on the compression performance of carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, 281, 115063.

62. Zhu, Z., Shih, A. J., & Chen, L. (2025). Cutting edge temperature and drill wear in dry and minimum quantity lubrication environmentally-friendly drilling of the titanium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 9517-9525. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.010>

### Список використаних джерел

1. Aamir, M., Tolouei-Rad, M., Giasin, K., & Nosrati, A. (2019). Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review [Review]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5-6), 2289-2308. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04348-z>

2. Abdelhafeez, A. M., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Dowson, A., & Arnold, D. (2015). Burr formation and hole quality when drilling titanium and aluminium alloys [Proceedings Paper]. *Cirpe 2015 - Understanding the Life Cycle Implications of Manufacturing*, 37, 230-235. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.019>

3. Alonso, U., Calamaz, M., Girot, F., & Iriondo, E. (2019). Influence of flute number and stepped bit geometry when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks [Article]. *Journal of Manufacturing Processes*, 39, 356-370. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.02.006>

4. Alvarez, M., Salguero, J., Sanchez, J. A., Huerta, M., & Marcos, M. (2011). SEM and EDS Characterisation of Layering TiOx Growth onto the Cutting Tool Surface in Hard Drilling Processes of Ti-Al-V Alloys [Article]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2011, 10, Article 414868. <https://doi.org/10.1155/2011/414868>

5. Alvarez-Alcon, M., de Lacalle, L. N. L., & Fernandez-Zacarias, F. (2020). Multiple Sensor Monitoring of CFRP Drilling to Define Cutting Parameters Sensitivity on Surface Roughness, Cylindricity and Diameter [Article]. *Materials*, 13(12), 17, Article 2796. <https://doi.org/10.3390/ma13122796>

6. An, Q. L., Dang, J. Q., Li, J. L., Wang, C. Y., & Chen, M. (2020). Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences [Article]. *Composite Structures*, 253, 13, Article 112794. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112794>

7. Arjun, N., Alper, U., Suhasini, G., & Jawahir, I. S. (2022). Analysis of surface integrity in drilling carbon fiber reinforced polymer composite material under various cooling/lubricating conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, 124-137. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.065>

8. Astakhov, V. P. (2024). *High-productivity drilling tools: Design and geometry*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003263296>

9. Astakhov, V. P., & Shvets, S. V. (2020). Technical Resource of the Cutting Wedge is the Foundation of the Machining Regime Determination [Article]. *International Journal of Manufacturing Materials and Mechanical Engineering*, 10(2), 1-17. <https://doi.org/10.4018/ijmmme.2020040101>

10. Aydin, E., & Nalbant, M. (2020). The effect of drill point angles on drillability in CFRP/Al-7075 stacking drilling [Article]. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(2), 917-931. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.548419>

11. Balan, A. S. S., Kannan, C., Jain, K., Chakraborty, S., Joshi, S., Rawat, K.,...Thakur, V. K. (2021). Numerical Modelling and Analytical Comparison of Delamination during Cryogenic Drilling of CFRP [Article]. *Polymers*, 13(22), 15, Article 3995. <https://doi.org/10.3390/polym13223995>

12. Beal, A., Kim, D., Park, K. H., Kwon, P., & Asme. (2011). A COMPARATIVE STUDY OF CARBIDE TOOLS IN DRILLING OF CFRP AND CFRP-TI STACKS [Proceedings Paper]. *Proceedings of the Asme International Manufacturing Science and Engineering Conference 2011*, Vol 1, 145-+.
13. Benezech, L., Landon, Y., & Rubio, W. (2012). Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling. In M. Karama (Ed.), *Innovating Processes* (Vol. 423, pp. 1-11). Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.423.1>
14. Chaosheng, L., Niancong, L., Lei, C., Wuyu, C., Yanzong, L., & Miaoke, Z. (2024). Analysis of the effects of different milling strategies on helical milling of unidirectional CFRP under minimum quantity lubrication. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.072>
15. Chealvan, S. H., Krishnaraj, V., & Abd Rahim, E. (2022). High speed cryogenic drilling of Ti-6Al-4V alloy under high pressure coolant conditions [Article]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 236(12), 1633-1642, Article 09544054221080025. <https://doi.org/10.1177/09544054221080025>
16. Chen, C., Zhao, Q., Wang, A., Zhang, J., Qu, Q., & Shi, Z. (2023). Numerical Study of Step Drill Structure on Machining Damage in Drilling of CFRP/Ti Stacks. *Materials*, 16, 6039. <https://doi.org/10.3390/ma16176039>
17. Chen, J., Zhang, X., Xue, Z., Yan, Y., Fan, X., An, Q.,...Ko, T. J. (2025). Multi-material stage-specific analysis and WSTVF based feature engineering for enhanced tool wear monitoring in CFRP/Ti stacks drilling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 234, 112829. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112829>
18. Chowdhury, M. S. I., Chowdhury, S., Yamamoto, K., Beake, B. D., Bose, B., Elfizy, A.,...Veldhuis, S. C. (2017). Wear behaviour of coated carbide tools during machining of Ti6Al4V aerospace alloy associated with strong built up edge formation [Article]. *Surface & Coatings Technology*, 313, 319-327. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.115>
19. Debar, B., Rey, P. A., & Cherif, M. (2025). Investigation of burr formation in Ti-6Al-4V drilling. *Journal of Manufacturing Processes*, 142, 482-493. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.03.108>
20. Franz, G., Vantomme, P., & Hassan, M. H. (2022). A Review on Drilling of Multilayer Fiber-Reinforced Polymer Composites and Aluminum Stacks: Optimization of Strategies for Improving the Drilling Performance of Aerospace Assemblies. *Fibers*, 10, 78. <https://doi.org/10.3390/fib10090078>
21. Fu, Q., Wu, S. J., Li, C. H., Xu, J. Y., & Wang, D. Z. (2022). Delamination and chip breaking mechanism of orthogonal cutting CFRP/Ti6Al4V composite [Article]. *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 183-196. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.015>
22. Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Zhang, M., Jiang, X., & Zhang, D. (2020). Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP. *Composites Part B: Engineering*, 183, 12. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107698>
23. Hassan, A. A., Soo, S. L., Aspinwall, D. K., Arnold, D., & Dowson, A. (2020). An analytical model to predict interlayer burr size following drilling of CFRP-metallic stack assemblies [Article]. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 69(1), 109-112. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.038>
24. Hassan, M. H., Abdullah, J., & Franz, G. (2022). Multi-Objective Optimization in Single-Shot Drilling of CFRP/Al Stacks Using Customized Twist Drill [Article]. *Materials*, 15(5), 25, Article 1981. <https://doi.org/10.3390/ma15051981>
25. Hiremath, A., Malghan, R. L., Bolar, G., & Polishetty, A. (2025). Comprehensive machinability assessment of Ti6Al4V alloy during drilling and helical milling using sustainable dry condition. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 19, 1987-2002. <https://doi.org/10.1007/s12008-024-01964-2>
26. Jia. (2020). Multi-margin drill structure for improving hole quality and dimensional consistency in drilling Ti/CFRP stacks. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 9.
27. Jia, Z. Y., Chen, C., Wang, F. J., Zhang, C., & Wang, Q. (2020). Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11-12), 5099-5109. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05029-y>

28. Jinyang, X., Norbert, G., Jiaxin, S., Vijayan, K., & Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: fundamental mechanisms, damage issues, and approaches. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9677-9707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>
29. Jinyang, X., Youkang, Y., Davim, J. P., Linfeng, L., Min, J., Norbert, G., & Ming, C. (2022). A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites. *Composite Structures*, 294, 115594. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115594>
30. John, K. M., Thirumalai Kumaran, S., Kurniawan, R., & Ahmed, F. (2022). Evaluation of thrust force and delamination in drilling of CFRP by using
31. active spring restoring backup force. *Materials Today: Proceedings*, 49(2), 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.033>
32. Kim, D., & Ramulu, M. (2004). Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. *Composite Structures*, 63(1), 101-114. [https://doi.org/10.1016/s0263-8223\(03\)00137-5](https://doi.org/10.1016/s0263-8223(03)00137-5)
33. Kolesnyk. (2020). Experimental study of drilling temperature, geometrical errors and thermal expansion of drill on hole accuracy when drilling CFRP/Ti alloy stacks. *Materials*, 13(14), 17.
34. Li, E. M., Zhou, J. T., Yang, C. S., Zhao, J. H., Li, Z. Y., Zhang, S. S., & Wang, M. W. (2023). Part machining deformation prediction based on spatial-temporal correlation learning of geometry and cutting loads [Article]. *Journal of Manufacturing Processes*, 92, 397-411. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.02.042>
35. Li, M. J., Huang, M. J., Chen, Y. W., Kai, W., & Yang, X. J. (2019). Experimental study on hole characteristics and surface integrity following abrasive waterjet drilling of Ti6Al4V/CFRP hybrid stacks [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(9-12), 4779-4789. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04334-5>
36. Luo, B., Zhang, K. F., Liu, S. N., Cheng, H., & Wang, R. X. (2019). Investigation on the interface damage in drilling low-stiffness CFRP/Ti stacks [Article]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(9), 2211-2221. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.04.017>
37. Martin, R., & Evans, D. (2000). Reducing costs in aircraft: The metals affordability initiative consortium. *JOM*, 52, 24-28.
38. Oliaei, S. N. B., & Karpat, Y. (2017). Investigating the influence of friction conditions on finite element simulation of microscale machining with the presence of built-up edge [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), 819-829. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9456-9>
39. Peterka, J., & Pokorny, P. (2014). Influence of the Lead Angle from the Vertical Axis Milling on Effective Radius of the Cutter [Proceedings Paper]. *Precision Machining VII*, 581, 44-49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.581.44>
40. Poor, D. I., Geier, N., Pereszlai, C., & Xu, J. Y. (2021). A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges [Review]. *Composites Part B-Engineering*, 223, 17, Article 109155. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>
41. Priarone. (2017). Diamond drilling of carbon fiber reinforced polymers: Influence of tool grit size and process parameters on workpiece delamination. *Procedia CIRP*, 66, 181-186.
42. Prisco, U., Impero, F., & Rubino, F. (2019). Peck drilling of CFRP/titanium stacks: effect of tool wear on hole dimensional and geometrical accuracy [Article]. *Production Engineering-Research and Development*, 13(5), 529-538. <https://doi.org/10.1007/s11740-019-00915-1>
43. Rodriguez, I., Arrazola, P. J., Cuesta, M., & Pušavec, F. (2024). Hole quality improvement in CFRP/Ti6Al4V stacks using optimised flow rates for LCO2 and MQL sustainable cooling/lubrication. *Composite Structures*, 329, 117687. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117687>
44. Salguero, J., Batista, M., Sanchez, J. A., & Marcos, M. (2011). An XPS Study of the Stratified Built-Up Layers Developed onto the Tool Surface in the Dry Drilling of Ti Alloys [Proceedings Paper]. *Modelling of Machining Operations*, 223, 564-+. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.223.564>
45. Shariar, F., Karagüzel, U., & Karpat, Y. (2025). A hybrid model to analyze stress distributions at the tool and workpiece interface during drilling of thick CFRP laminates considering thermal effects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15717-2>

46. Sharma, P., Mishra, S. K., & Ramkumar, J. (2025). Damage mechanisms and wear progression of advanced AlTiSiN coatings deposited on WC/Co cemented carbide cutting tools for machining under cryogenic conditions [Article]. *CERAMICS INTERNATIONAL*, 51(27), 54530-54548. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.09.183>
47. Shixiong, W. U., Xiaojian, M. E. I., Yimin, L. I. N., Xiaowei, Z., Chengyong, W., & Chaolin, T. A. N. (2025). Surface integrity in titanium alloy cutting: A comprehensive review. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2025.103903>
48. Shu, L. M., Li, S. H., Fang, Z. L., Kizaki, T., Kimura, K., Arai, G.,... Sugita, N. (2021). Study on dedicated drill bit design for carbon fiber reinforced polymer drilling with improved cutting mechanism [Article]. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 142, 17, Article 106259. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106259>
49. Soori, M., & Arezoo, B. (2023). Dimensional, geometrical, thermal and tool deflection errors compensation in 5-Axis CNC milling operations [Article; Early Access]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 15. <https://doi.org/10.1080/14484846.2023.2195149>
50. Vijayathithan, M., & Anil, M. (2025). Predictive modelling of tool wear in CFRP drilling using acoustic emission sensors under dry and cryogenic conditions. *Wear*, 570, 205930. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205930>
51. Wang. (2021). Novel chip-breaking structure of step drill for drilling damage reduction on CFRP/Al stack. *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 9.
52. Wang, Q., & Jia, X. L. (2021). Optimization of cutting parameters for improving exit delamination, surface roughness, and production rate in drilling of CFRP composites [Article]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(11-12), 3487-3502. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07918-2>
53. Wong, F. R. (2008). Effect of drill geometry of uncoated tool when drilling titanium alloy Ti-6Al-4V (Master's thesis). In.
54. Xu, J. Y., Ji, M., Davim, J. P., Chen, M., El Mansori, M., & Krishnaraj, V. (2020). Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills [Article]. *Composite Structures*, 234, 13, Article 111727. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>
55. Xu, J. Y., Kolesnyk, V., Li, C. P., Lysenko, B., Peterka, J., & Gupta, M. K. (2023). A critical review addressing conventional twist drilling mechanisms and quality of CFRP/Ti stacks [Review]. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr&T*, 24, 6614-6651. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.226>
56. Xu, J. Y., Li, C., El Mansori, M., Liu, G. Y., & Chen, M. (2018). Study on the Frictional Heat at Tool-Work Interface when Drilling CFRP Composites [Proceedings Paper]. *46th Sme North American Manufacturing Research Conference, Namrc 46*, 26, 415-423. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.049>
57. Xu, J. Y., Mkaddem, A., & El Mansori, M. (2016). Recent advances in drilling hybrid FRP/Ti composite: A state-of-the-art review [Review]. *Composite Structures*, 135, 316-338. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.09.028>
58. Yang, D., Liu, G., & Li, X. (2025). Cryogenic Temperature-Dependent Machining Forces and Surface Integrity of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.202502270>
59. Yu, J. J., Pan, Z. X., Ye, W., Li, Q. C., & Wu, Z. Y. (2023). Dynamic temperature field and drilling damage mechanism of plain woven carbon/glass hybrid composites. *COMPOSITE STRUCTURES*, 304, 116375, Article 116375. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116375>
60. Yuanxiao, L., Feng, J., Ziqiang, Z., Xue, W., & Ying, N. (2024). A prediction model for drilling temperature of CFRP/Ti stacks and green cooling strategy considering chip ejection process. *Journal of Materials Processing Tech.*, 329, 118424. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2024.118424>
61. Zhang. (2022). Effect of embedded delamination on the compression performance of carbon fiber reinforced composites. *Composite Structures*, 281, 115063.

62. Zhu, Z., Shih, A. J., & Chen, L. (2025). Cutting edge temperature and drill wear in dry and minimum quantity lubrication environmentally-friendly drilling of the titanium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 9517-9525. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.010>.

Дата першого надходження статті до видання: 19.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.11.2025

УДК 621.9

**Віталій Колесник<sup>1</sup>, Олександр Березняк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри Технологія машинобудування верстати та інструменти  
Сумський державний університет (Суми, Україна), ГО «СКІМ Індустрія 5.ЮА» (Суми, Україна)

E-mail: [v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:v.kolesnik@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0417-3801>

<sup>2</sup>аспірант кафедри Технології машинобудування верстати та інструменти.

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [o.bereznayak@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:o.bereznayak@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0417-3801>

## **ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ТА ТРИБОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РІЗАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ПАКЕТІВ «ВУГЛЕПЛАСТИК–ТИТАНОВИЙ СПЛАВ»**

Механічне оброблення багатошарових пакетів «вуглепластик–титановий сплав» є однією з найбільш складних і науково актуальних задач сучасного авіабудування. Поєднання матеріалів із принципово різними фізико-механічними властивостями зумовлює істотну неоднорідність термомеханічних і трибологічних умов у зоні різання. Таке поєднання ускладнює керування процесом та забезпечення якості оброблення. У статті виконано аналітичний огляд сучасних наукових досліджень, присвячених фізиці процесу різання вуглепластиків, титанових сплавів та їх пакетів.

Розглянуто основні механізми руйнування вуглепластиків, зокрема крихкий злам волокон, деградацію полімерної матриці та розшарування. Окремо приділено увагу особливостям різання титанових сплавів. Зокрема, приділено увагу впливу високих контактних напружень, високої температури різання та адгезійної взаємодії інструмента на процес формування стружки та якість обробленої поверхні. Визначено, що особливістю фізики різання пакетів «вуглепластик–титановий сплав», є взаємний вплив шарів на механіку формування стружки, пов'язаний з послідовністю оброблення шарів, силовими та температурними навантаженнями інструменту.

Проаналізовано механізми зношення інструмента та формування наросту під впливом температури різання, тертя на контактних поверхнях, матеріалу і покриття інструмента, а також методів охолодження та змащення. На основі огляду літературних джерел визначено, що, попри значну кількість досліджень, питання формування наросту при свердлінні отворів у пакетах «вуглепластик – титановий сплав» залишаються недостатньо вивченими, особливо з урахуванням міжшарової взаємодії та змінного характеру процесу різання при переході інструменту з шару вуглепластика у шар титанового сплаву. Отримані узагальнення можуть бути використані як наукове підґрунтя для подальших досліджень і вдосконалення технологій механічного оброблення багатошарових з'єднань з використанням полімерних композиційних матеріалів, титанових та алюмінієвих сплавів.

**Ключові слова:** вуглепластик, титановий сплав, багатошарові пакети, механічне оброблення, фізика різання, зношування інструменту, нарост.

Рис.: 2. Табл. 2. Бібл.: 61.



DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-99-121](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-99-121)

УДК 621.326

**Олексій Сергійович Козирєв<sup>1</sup>, Олексій Дмитрович Кагляк<sup>2</sup>,  
Максим Вікторович Романенко<sup>3</sup>, Віктор Леонідович Дубнюк<sup>4</sup>,  
Юрій Валентинович Ключников<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [kozyriev.oleksii@lil.kpi.ua](mailto:kozyriev.oleksii@lil.kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5385-8578>

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

<sup>3</sup>аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [m.romanenko@kpi.ua](mailto:m.romanenko@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

<sup>4</sup>старший викладач кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [v.dubniuk@kpi.ua](mailto:v.dubniuk@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6146-9265>

<sup>5</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)  
E-mail: [yu.klyuchnikov@gmail.com](mailto:yu.klyuchnikov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-6340>

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО НАГРІВАННЯ МЕТАЛІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ

*Розглянуто тривимірну математичну модель теплопровідності під впливом лазерного джерела теплоти та розробку чисельного методу розв'язання оберненої задачі, що дозволяє реконструювати технологічні параметри обробки. Запропонована модель поєднує представлення поглиненої лазерної енергії з просторовою дискретизацією променя на кільцеві зони та сектори, що дозволяє апроксимувати розподіл реальної інтенсивності. Задача прямої теплопровідності вирішується за допомогою схеми скінченних різниць. Обернена задача формулюється як мінімізація функціоналу залишків. Модель може бути застосована для розробки та оптимізації систем керування та прогнозного моделювання в промислових лазерних технологіях.*

**Ключові слова:** лазерний нагрів; теплопровідність; обернена задача; числове моделювання; температурне поле; лазерна термообробка.

Рис.: 4. Табл.: 3. Бібл.: 30.

**Актуальність теми.** Лазерна обробка матеріалів є однією з найбільш інноваційних технологій сучасності, яка широко використовується в таких галузях, як машинобудування, авіаційна промисловість, медицина, мікроелектроніка тощо. Висока точність та контрольованість процесу, дозованість вводу енергії в зону обробки та її висока концентрація забезпечують унікальні можливості для обробки різних матеріалів.

У процесах лазерної термічної обробки, зварювання, наплавлення, поверхневого гартування та лазерного згинання саме температурні поля визначають розвиток фазових перетворень, структуру матеріалу, формування залишкових напружень і деформацій. Для коректного проектування таких процесів потрібні моделі, здатні адекватно відтворювати теплові процеси в металі. Сучасні тенденції розвитку лазерних технологій — зокрема, адитивне виробництво, мікрообробка та прецизійні процеси — вимагають підвищення точності математичного моделювання. Тому актуальність дослідження визначається потребою підвищення точності прогнозування теплових процесів при лазерній дії на метали, що є ключовим для забезпечення керованого термічного впливу та формування необхідних властивостей матеріалу.

**Постановка проблеми.** Однак для забезпечення необхідних точності та якості обробки важливо розуміти теплові процеси, що відбуваються під час дії лазерного випромінювання. Точне моделювання теплових полів і врахування фазових переходів дозволяє прогнозувати кінцевий результат та оптимізувати параметри технологічного процесу. Разом з тим, задача відтворення технологічних параметрів обладнання для отримання необхідного термічного стану в зоні обробки ще немає універсального вирішення.

Через те, що основною дією лазерного променя в більшості його застосувань є термічна дія, така задача відтворення може бути принаймні частково зведена до зворотної задачі теплопровідності.

Прямі задачі теплопровідності – такі, для яких відомі граничні умови, початковий стан і властивості матеріалу, а все температурне поле в моделі можна обчислити. Навпаки, зворотна проблема визначається як визначення невідомих причин на основі спостереження за їхніми наслідками.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розв'язання ІНСР (Inverse Heat Conduction Problem) часто потребує використання складної математичної моделі [1–4]. З цієї причини ідентифікація перехідних процесів є важкою для багатьох інженерів. Широко використовувані комерційні програми для моделювання теплового потоку важко застосовувати, оскільки вони вимагають визначення всіх граничних умов. Проте в задачах зворотної теплопровідності часто граничні умови не можна визначити і їх обчислюють, наприклад, на основі температури всередині моделі при послідовному підході Бека [4,5]. Комерційне програмне забезпечення ANSYS Multiphysics, яке використовує метод скінченних елементів (FEM), застосовано в [6]. Невідому граничну умову представляли як сходову або поліноміальну функцію.

Наведені методи вимагали вимірювань, на основі або з використанням яких відтворювалися граничні умови. Натомість в [7] вимірювання використовувалися для відтворення джерела теплоти. Потім зв'язки між параметрами процесу та геометрією шару оболонки й параметрами джерела теплоти виводилися за допомогою регресійного аналізу. Спосіб вирішення нестационарних зворотних задач теплопровідності на основі способу граничних елементів (BEM) і способу завдання послідовних функцій (SFEM) розглянуто в [8], представлено метод BEM та метод послідовної специфікації функцій, які використовуються для дослідження зворотного завдання ідентифікації граничного теплового потоку. У методі прямі задачі вирішувалися за допомогою BEM і використовувалися для розрахунку необхідного значення температури дискретної точки.

Зворотні задачі теплопровідності математично класифікуються як неправильно поставлені, тому для перетворення неправильно поставленої ІНСР у коректну зазвичай потрібні спеціальні методи вирішення. Попри те, що деякі аналітичні рішення доступні для цієї мети [9–13], їхнє застосування в ІНСР обмежене. З цієї причини було розроблено ряд чисельних підходів для вирішення ІНСР [14].

Більшість чисельних методів повторюють обернену задачу як задачу мінімізації за методом найменших квадратів у всій області часу або в послідовних інтервалах часу. Серед них метод спряженого градієнта (CGM) отримує все більше уваги, оскільки він може покращити швидкість збіжності зворотної оцінки шляхом вибору напрямку спуску як лінійної комбінації напрямку градієнта на поточній ітерації з напрямком спуску на попередній ітерації [15].

Також певну цікавість викликає розробка нелінійних зворотних підходів до оцінки теплофізичних властивостей і коефіцієнтів конвективної теплопередачі на границях [16]. Проте більшість алгоритмів мали справу з одно- або двомірними задачами.

Крім методів, які можна віднести до спеціальних, потрібно відзначити певні зусилля в напрямку знаходження фундаментального (MFS) рішення ІНСР [17], коли рішення отримувалося через перетворення змінних. Потім для розв'язання отриманого матричного рівняння, яке є дуже погано обумовленим, застосовуються розклад усіченого сингулярного значення та критерій L-кривої. Схожий підхід має місце при використанні методу комплексного диференціювання змінних (CVDM) для методу кінцевих елементів (FEM) [18]. Тут спочатку встановлюються комплексні змінні FEM, потім точно оцінюються ключові параметри алгоритму Левенберга-Марквардта.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Постановка обернених задач з граничними умовами Неймана (II роду) з нелінійними, себто залежними від температури теплофізичними властивостями, у 3D-конфігурації практично не ставилася, а саме цей тип граничних умов (заданий тепловий потік на поверхні) є притаманним задачам лазерного нагрівання. Тому виникає необхідність у розробці чисельного методу для вирішення зворотної задачі теплопровідності на основі аналізу теплових полів з метою визначення технологічних параметрів обладнання для проведення певної лазерної обробки матеріалів з необхідними вихідними параметрами.

**Мета дослідження.** Проаналізувати існуючі підходи до вирішення зворотних задач теплопровідності. Розробити чисельну модель, що пов'язує енергію, яка переноситься лазерним променем, теплофізичні властивості матеріалу та умови теплообміну з термічним впливом випромінювання, а також зворотну модель, що пов'язує параметри температурного поля з технологічними параметрами обладнання. Порівняти отримані результати з результатами за модельним методом (FEM) та з експериментальними даними. Об'єктом дослідження є процеси лазерної взаємодії з матеріалами. Предметом дослідження є можливість відтворення технологічних параметрів обробки теплових полів при лазерній обробці металів.

#### Виклад основного матеріалу

**Пряма задача лазерного нагрівання.** При лазерній обробці визначальним фактором, що визначає результати обробки, є нагрівання вище певної межі. Задача полягає в тому, щоби знайти параметри обробки, які б забезпечили такий перегрів. Для цього можна використати будь-яку теплову модель, яка забезпечує відносно високу швидкість розрахунків і дає набір прямих залежностей температури від керованих факторів і яка забезпечує задовільну точність. Це дозволить побудувати модель, яка б пов'язувала невідомі параметри процесу з необхідною температурою до якої потрібно нагріти.

Для прогнозування результатів операцій лазерної обробки матеріалів використовують різні фізичні або статистичні моделі. Причому, всі вони мають ті чи інші недоліки, які знижують точність або обмежують можливість прогнозування. До таких недоліків слід віднести обмежений облік факторів, що значимо впливають на результати обробки (температурну залежність параметрів мішені, що змінюється в процесі взаємодії, форму лазерного променя, динаміку різних фаз матеріалу) у фізичних моделях, і обмеженість у застосуванні та високу трудомісткість при побудові статистичних моделей. З метою підвищення точності фізичного моделювання пропонується дискретизувати як лазерний промінь, так і заготовку (мішень).

**Скінченно-різницева схема.** Розглянемо теплову дію лазерного променя на матеріал мішені. Для цього будемо використовувати явну інтерполяційну схему рішення задачі нагрівання. У цьому випадку використання змінного кроку сітки буде неекономічним [19]. Тоді вираз для температури з використанням центральної різницевої схеми апроксимації матиме вигляд:

$$T_{i,j,k}^{s+1} = T_{i,j,k} + \frac{\lambda(T_{i,j,k})\Delta t}{c(T_{i,j,k})\rho(T_{i,j,k})} \times [T_{i-1,j,k} + T_{i+1,j,k} + T_{i,j-1,k} + T_{i,j+1,k} + T_{i,j,k-1} + T_{i,j,k+1} - 6T_{i,j,k}] \quad (1)$$

(для простоти запису індекс  $s$  у правій частині опущено). Вираз (1) дозволяє визначити температуру всередині тіла в поточний момент часу  $s$ , знаючи температуру в попередній момент часу  $s-1$  у всіх внутрішніх точках тіла. Таким чином, для розрахунків за цією формулою необхідно знати температуру на границі тіла.

Для цього уявимо обсяг мішені, як сукупність елементарних об'ємів (Рис. 1), які за формою являють собою куб з ребром, рівним кроку сітки  $h$  і, відповідно, обсягом  $\Delta V = h^3$ . Якщо крок досить малий, можна вважати, що елементарний об'єм має такі властивості:

- у всіх точках елементарного об'єму температура однакова в будь-який момент часу;
- в елементарному об'ємі всі теплофізичні характеристики матеріалу, які залежать від температури, однакові;
- між сусідніми елементарними об'ємами є повний теплової контакт.



Рис. 1. Матеріал мішені у вигляді елементарних об'ємів

Внаслідок малості часу впливу випромінювання, з теплового балансу елементарного об'єму виключені конвективний і променевий теплообміни.

Для елементарних об'ємів, які розташовані на поверхні, баланс енергії має вигляд

$$Q_A = Q_\lambda + Q_T,$$

де  $Q_A = \sum_{i=1}^n A_i(T) E_i$  – сумарна поглинена даним елементарним об'ємом енергія;

$n$  – кількість променів на поверхні;

$Q_\lambda$  – теплота, отримана або втрачена елементарним об'ємом за рахунок механізму теплопровідності;

$Q_T$  – теплота, що залишилася в елементарному обсязі і яка призводить до підвищення температури.

У силу малості кроку за часом будемо вважати, що в результаті поглинання елементарним об'ємом кількості теплоти  $Q_A$  його температура миттєво збільшилася на величину

$$\Delta T_A = \frac{Q_A}{\Delta V \rho c}.$$

Кількість теплоти, що проходить за час  $\Delta t$  через площу  $h^2$ , буде

$$\Delta Q = -\lambda \cdot \Delta T \cdot h^2 \cdot \Delta t,$$

де  $\Delta T$  – різниця температур елементарних об'ємів, що взаємодіють.

Остаточну температуру елементарного об'єму, який належить поверхні, можна визначити, як

$$\Delta T = \frac{Q_\lambda}{\Delta V \rho c} = \frac{Q_A - Q_T}{\Delta V \rho c} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i(T) E_i - \sum_{i=1}^{N_n} \Delta Q_i}{\Delta V \rho c},$$

де  $N_n$  – чисельність взаємодіючих (сусідніх) елементарних об'ємів, яке може лежати в діапазоні від одиниці (для ізолюваного об'єму) до п'яти (об'єм належить поверхні напів-нескінченного тіла).

Прийнята різницева схема вважається придатною, а рішення стійким, якщо при зменшенні кроку по простору воно безперервно сходиться до точного рішення вихідного різницевого рівняння. Згідно з вимогою стійкості рішення рівняння теплопровідності різницевою методом на крок за часом накладається обмеження  $F_0 \leq 0,5$ , тобто

$$\Delta t \leq \frac{h^2}{2a_{\max}},$$

де  $a_{\max}$  — максимальне значення температуропровідності для можливого діапазону температур.

Таким чином, алгоритм розрахунку температур на даному етапі, за відсутності фазових переходів, виглядає так:

- розрахунок кількості променів, що потрапляють на кожен розташований на поверхні елементарний об'єм;
- розрахунок миттєвого збільшення температури для поверхневих об'ємів;
- розрахунок зміни кількості теплоти в поверхневих елементарних об'ємах за рахунок механізму теплопровідності;
- розрахунок температури поверхневих елементарних об'ємів;
- розрахунок температур у внутрішніх елементарних об'ємах.

Якщо температура елементарного об'єму досягає температури фазового переходу, в розрахунку температур необхідно враховувати теплоту фазового переходу. Найпростіше це можна зробити [19], з огляду на зміну об'ємної теплоємності при фазовому переході:

$$c(T)\rho(T) = c_v + L_m \delta(T - T^*).$$

**Використання граничних умов.** Під час обробки лазерним променем виникає необхідність математичного моделювання процесу нагрівання. Як правило, неможливо отримати рішення диференціального рівняння теплопровідності в замкнутому вигляді, тому вдаються до різних чисельних методів, таких як метод кінцевих різниць або кінцевих об'ємів. Останній має певні переваги, серед яких збереження по всій області таких величин, як енергія системи та теплові потоки, задовільна швидкість розрахунку та легкість розбиття тіла на елементи різних геометричних типів. Водночас можуть виникнути певні труднощі при описі граничних умов, оскільки для граничних контрольних об'ємів, порівняно з внутрішніми, змінюються умови теплообміну. Переважно розглядають два види граничних умов: умова Діріхле (задана температура границі) та умова Неймана (заданий потік теплоти на границі). Умову Діріхле простіше використовувати в алгоритмах, але для завдань лазерного нагріву характерна саме умова Неймана через інтенсивність випромінювання та оптичні характеристики поверхні. Спробуємо подати завдання нагріву лазерним випромінюванням, звівши умови на границі до умов Діріхле. Для цього пропонується розбити лазерний промінь на окремі промені та простежити їх взаємодію з розглянутими вище контрольними об'ємами на поверхні.

**Поширення сферичної хвилі з довільного резонатора.** При поширенні сферичної хвилі з довільного резонатора напрям вектора перенесення енергії (вектор Пойнтинга) буде збігатися з напрямком нормалі поверхні рівної фази в будь-якій точці цієї поверхні.

$$\omega(x) = \omega_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda x}{\pi \omega_0} \right)^2}, \quad (2)$$

де  $\omega_0$  — радіус пучка в перетяжці резонатора.

Вираз (2) отримано для ідеального порожнього резонатора рішенням хвильового скалярного рівняння Гельмгольца [20]. За допомогою виразу (2) можна знайти граничний кут нахилу дотичної до  $\omega(x)$  осі  $\vec{X}$ :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{\lambda}{\pi \omega_0}.$$

Вираз  $\frac{\lambda}{\pi\omega_0}$  називають дифракційною складовою  $\Theta_d$  повної розбіжності. У свою чергу, повна розбіжність дорівнює  $\Theta = \sqrt{\Theta_d^2 + \Theta_g^2}$ , де  $\Theta_g$  – Геометрична складова повної розбіжності [21]. Причому відомо, що у загальному випадку геометрична складова значно перевищує дифракційну. Пояснюється це у тому числі і процесами, що відбуваються в реальному резонаторі, такими як роз'юстування, термолінза, конкуренція мод при «розгорянні» генерації в резонаторі і т. п. [21].

Таким чином, вираз (2) є недостатнім для повної характеристики випромінювання, що формується реальним непустим резонатором, який містить середовище з коефіцієнтом заломлення відмінним від коефіцієнта заломлення порожнього ізотропного простору.

Для опису поширення випромінювання, що формується реальним оптичним резонатором, можна запропонувати такий вираз [21]:

$$\omega(x) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{x}{x_R}\right)^2}, \quad (3)$$

де  $x_R$  – релеївська довжина, тобто відстань, на якій розмір променя збільшується у  $\sqrt{2}$  раз порівняно з розміром у перетяжці. Причому і розмір променя у перетяжці, і релеївська довжина залежать не тільки від довжини хвилі випромінювання, а й від модового складу:

$$\begin{aligned} x_R &= \frac{\pi\omega_0^2}{M^2\lambda}; \\ \omega_0 &= M^2 \frac{\lambda}{\pi\Theta}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\Theta$  – повний кут розбіжності;

$M^2$  – модовий множник, який дорівнює одиниці для гаусівської моди та більше одиниці для мод вищого порядку.

Формули (2–4) можуть адекватно описати поширення лазерного випромінювання і, як буде показано нижче, перенесення енергії лазерного випромінювання. Однак усі ці формули повинні базуватися на експериментальних даних, виміряних конкретного випромінювача. Необхідно знати положення перетяжки всередині резонатора, а також виміряти розбіжність випромінювання та діаметр променя на певній відомій відстані від площини перетяжки.

Припустимо, що на підставі вимірювань отримано розбіжність випромінювання  $\Theta$  та радіус променя  $\omega_e$  на відстані від площини перетяжки  $x_e$ . Для спрощення запису введемо коефіцієнт

$$K = \frac{M^2\lambda}{\pi}.$$

Тоді можна записати:

$$\omega_0 = \frac{K}{\Theta}; \quad x_R = \frac{\omega_0^2}{K}.$$

Підставивши ці вирази в (3), отримаємо

$$\omega(x) = \frac{1}{\Theta} \sqrt{K^2 + \Theta^4 x^2} \quad (5)$$

звідки:

$$K = \Theta \sqrt{\omega_e^2 - \Theta^2 x_e^2}.$$

Визначивши  $K$ , можна обчислити значення модового множника:

$$M^2 = \frac{\pi K}{\lambda}.$$

Також, скориставшись (5), можна розрахувати радіус пучка в перетяжці  $\omega_0$ .

$$\omega(x) = \sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x^2} \quad (6)$$

Напрямок вектора Пойнтінга збігатиметься з напрямом дотичної  $\omega(x)$ , тобто:

$$\frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{\Theta^2 x}{\sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x^2}} \quad (7)$$

Очевидно, що вираз (6) описуватиме поширення енергії з точки з координатами  $(0, \omega_0)$  у двовимірній системі координат  $\vec{X}\vec{O}\vec{Z}$  (рис. 2). Для повного опису розповсюдження енергії необхідно знайти рівняння розповсюдження енергії з точки з координатами  $(0, r_1)$ , причому  $0 \leq r_1 \leq \omega_0$ . Шукатимемо таке рівняння за аналогією з (6) у вигляді:

$$r(x) = \sqrt{r_1^2 + T^2 x^2}, \quad (8)$$

де  $T$  – невідомий параметр, який необхідно визначити. Для цього розглянемо на осі  $\vec{X}$  точку з координатами  $(x_e, 0)$ . Очевидно, що радіус променя в площині, перпендикулярній вісі  $\vec{X}$  і такий, що проходить через точку  $(x_e, 0)$ , буде

$$\omega(x_e) = \sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x_e^2} = \omega_e.$$

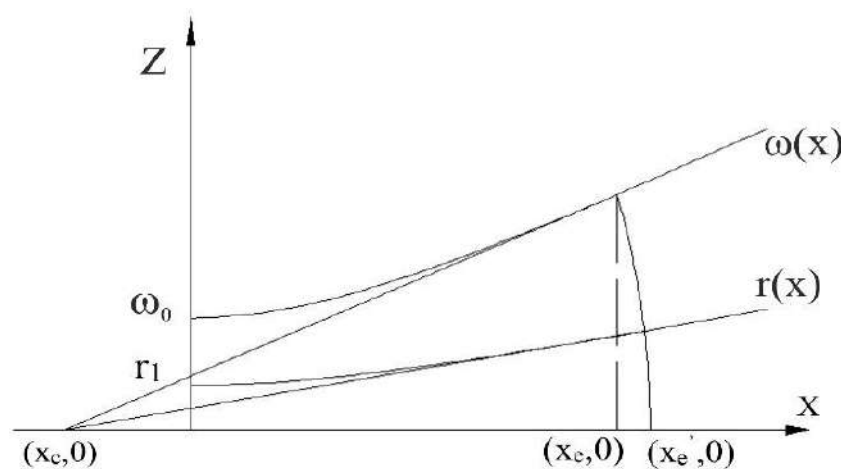


Рис. 2. Перенесення енергії довільним променем  $r(x)$

Визначивши кут нахилу дотичної в точці  $(x_e, 0)$  до кривої  $\omega(x)$  можна знайти центр кривизни хвильового фронту, що проходить через точку з координатами  $(x_e, \omega_e)$  зі співвідношення:

$$\frac{\omega(x_e)}{x_e - x_c} = \frac{d\omega(x_e)}{dx},$$

звідки:

$$x_c = -\frac{\omega_0^2}{\Theta^2 x_e}.$$

Радіус кривизни цього хвильового фронту можна визначити, як відстань між точками  $(x_c, 0)$  і  $(x_e, \omega(x_e))$ :

$$R = \sqrt{(x_e - x_c)^2 + \omega(x_e)^2} = \frac{\omega(x_e)}{\Theta^2 x_e} \sqrt{\omega(x_e)^2 + \Theta^4 x_e^2}. \quad (9)$$

Крива  $r(x)$  перетинає еквіфазну поверхню в точці з координатами  $(x'_e, r(x'_e))$ . Оскільки форма хвильового фронту вважається сферичною, мають виконуватися дві умови: дотична до кривої  $r(x)$ , що проходить через точку  $(x'_e, r(x'_e))$ , повинна також проходити через центр кривизни хвильового фронту  $(x_c, 0)$  (умова 1) так само, як і дотична до  $\omega(x)$  в точці  $(x_e, \omega(x_e))$  (умова 2).

Оскільки радіус кривизни хвильового фронту  $R$  постійний у всіх точках цього фронту, відстань між точками  $(x_c, 0)$  та  $(x_e, \omega(x_e))$  дорівнює відстані між точками  $(x_c, 0)$  і  $(x'_e, r(x'_e))$ .

При виконанні першої умови отримуємо:

Для кривої  $\omega(x)$ :

$$\frac{d\omega(x)}{dx} = \frac{\Theta^2 x_e}{\sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x_e^2}} = \frac{\sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x_e^2}}{x_e - x_c}. \quad (10)$$

І аналогічно для кривої  $r(x)$ :

$$\frac{dr(x)}{dx} = \frac{T^2 x'_e}{\sqrt{r_1^2 + T^2 x_e'^2}} = \frac{\sqrt{r_1^2 + T^2 x_e'^2}}{x'_e - x_c}. \quad (11)$$

Перетворюючи (10) і (11), отримуємо:

$$\begin{cases} -\Theta^2 x_e x_c = \omega_0^2 \\ -T^2 x'_e x_c = r_1^2 \end{cases} \quad (12)$$

Звідки:

$$T = \frac{r_1}{\omega_0} \Theta \sqrt{\frac{x_e}{x'_e}}. \quad (13)$$

Розглянемо у виразі (13) множник під коренем. Знайдемо максимальну величину для співвідношення  $\sqrt{\frac{x_e}{x'_e}}$ , яка, очевидно, буде при  $r_1=0$ . При виконанні умови (2) співвідношення  $\sqrt{\frac{x_e}{x'_e}}$  можна замінити наступним виразом:

$$\frac{x_e}{x'_e} = \frac{x_c + R \cos \Theta}{x_c + R}.$$

Однак оскільки розбіжність лазерного випромінювання становить всього кілька тисячних радіанів, можна стверджувати, що  $\cos \Theta \approx 1$ , звідки і

$$\sqrt{\frac{x_e}{x'_e}} \approx 1.$$



Як наслідок, остаточно отримуємо:

$$T = \frac{r_1}{\omega_0} \Theta.$$

а вираз (8) запишемо як

$$r(x) = \sqrt{r_1^2 + \frac{r_1^2 \Theta^2}{\omega_0^2} x^2} = \frac{r_1}{\omega_0} \sqrt{\omega_0^2 + \Theta^2 x^2} = \frac{r_1}{\omega_0} \omega(x). \quad (14)$$

За допомогою виразу (14) можна одержати напрямок вектора Пойнтінга в будь-якій точці в перерізі променя для будь-якої координати  $x$ . Крім того, за допомогою (14) можна знайти однозначну відповідність між інтенсивністю одиничного променя у будь-якій точці площини перетяжки та інтенсивністю в будь-якій точці в інших площинах перерізу. Для цього необхідно знати розподіл потужності у перерізі пучка.

**Перенесення енергії лазерним випромінюванням.** В ідеальному резонаторі інтенсивність основної моди розподілена за законом Гауса  $I = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0^2}\right)$ , де  $r^2 = y^2 + z^2$  – відстань від осі пучка, а  $\omega_0$  відіграє роль масштабного множника [22]. Однак у реальних резонаторах розподіл інтенсивності може відрізнятися від розподілу в ідеальному резонаторі. Причинами цього можуть бути роз'юстування дзеркал резонатора, розбіжність вісі активного елемента з віссю резонатора, теплові деформації активного елемента, неідеальна форма дзеркал резонатора [23]. Крім того, неоднакова освітленість перерізу активного елемента може призвести до зміщення точки з максимумом інтенсивності від центру. Важливу роль відіграє також та обставина, що в реальному резонаторі практично неможливо передбачити кількість мод, що збуджуються, і розподіл сумарної інтенсивності за модами різних порядків [23].

У зв'язку з цим вихідний розподіл інтенсивності випромінювання по перерізу необхідно визначати експериментально, з подальшою апроксимацією. Як апроксимуючу функцію можна запропонувати:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{(y-y_c)^2}{\omega_y^2} - \frac{(z-z_c)^2}{\omega_z^2}\right). \quad (15)$$

У цьому виразі  $y_c$  і  $z_c$  – координати точки в перерізі променю, де інтенсивність максимальна,  $\omega_y^2$  і  $\omega_z^2$  – масштабні коефіцієнти по осях  $y$  і  $z$  відповідно. У загальному випадку розподіл інтенсивності може бути не вісесиметричним, тобто  $\omega_y^2 \neq \omega_z^2$ . Розрахувати невідомі параметри  $y_c$ ,  $z_c$  і  $\omega_z^2$  можна за методом найменших квадратів (МНК) на підставі експериментальних даних, отриманих, наприклад, методом скануючої діафрагми. Оскільки діаметр променю в сканованому перерізі пучка відрізняється від розміру променю в перетяжці, зручно перейти до відносних (нормованих) одиниць вимірювання, розділивши інтенсивність на максимальну інтенсивність, а  $y$ ,  $z$  і  $\omega_z$  розділити на радіус пучка в сканованому перерізі. У цьому випадку координати  $y$  і  $z$  будуть в межах від -1 до +1, а інтенсивність – у межах від 0 до 1. Таким чином, можна прирівняти  $I_0=1$ . Для спрощення розрахунків МНК зручно замінити функцію відгуку її натуральним логарифмом:  $I' = \ln(I)$ . Остаточно замінюємо вираз (15) на:

$$I' = -(y-y_c)^2 \omega_y^{-2} - (z-z_c)^2 \omega_z^{-2}. \quad (16)$$

Залишається визначити потужність, що переноситься одиничним променем, залежно від координат цього променю. Для цього уявімо перетин пучка у вигляді кола, розділе-

ного на кільцеві ділянки, які, у свою чергу, розділені на сектори, кожен з яких буде джерелом одного променя (рис. 3). Очевидно, що кількість кільцевих ділянок дорівнюватиме  $N_r = \frac{r}{\Delta_r}$ , де  $\Delta_r$  – крок по радіусу і, одночасно, радіус центральної (кругової) зони.

Прийmemo центральну зону за початок відліку. Її площа буде  $S_1 = \pi(\Delta_r)^2$ . Для отримання координат вузлових точок, які будуть початками променів, скористаємося методами, які застосовуються при апроксимації аберацій, оскільки очевидно, що підсумковий розподіл поля на мішені є наслідком сферичних аберацій на елементах оптичної системи [24]. Відповідно, для знаходження вузлових точок вимагатимемо максимальної обумовленості конструкційної матриці. Тоді, якщо індекс кільцевої зони  $i$  набуває значення  $[1 \dots N_r]$ , число радіальних зон у кільцевій буде

$$N_i = 2i - \text{int}\left(\frac{1}{i}\right).$$

Площа  $i$ -ї кільцевої зони буде

$$S_i = \pi\Delta_r^2 i^2 - \pi(\Delta_r)^2 (i-1)^2 = \pi\Delta_r^2 (2i-1).$$

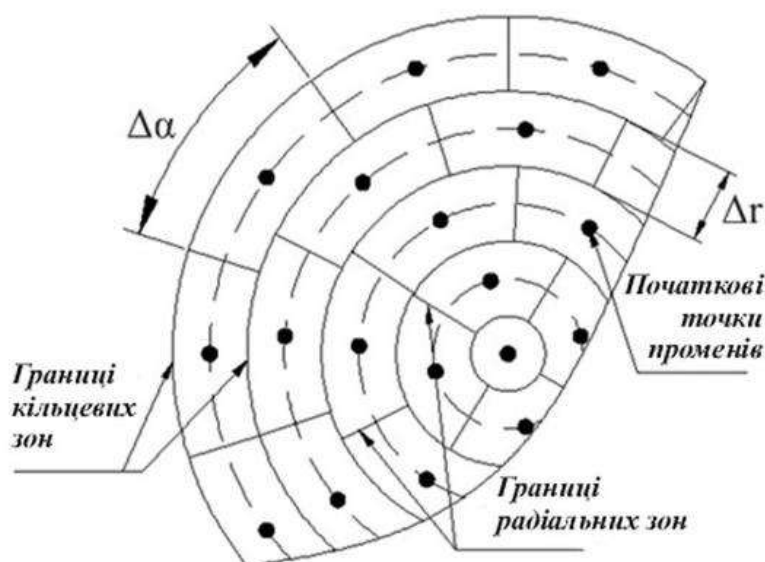


Рис. 3. Початкові координати векторів перенесення енергії випромінювання

Якщо кожна кільцева зона розбивається на радіальні зони однакової площі (елементарні майданчики), то площа кожного елементарного майданчика в  $i$ -й кільцевій зоні буде

$$S_{iE} = \frac{S_i}{N_i}.$$

Або для кільцевої зони, починаючи з другої:

$$S_{iE} = \pi\Delta_r^2 \frac{2i-1}{2i}.$$

Загальна кількість променів у променевому пакеті:

$$N_\Sigma = 1 + \sum_{i=2}^{N_r} 2i = N_r^2 + N_r - 1.$$

Таким чином, кожен елементарний майданчик, а отже, і кожен промінь пакета  $R_{ij}$  можна характеризувати двома індексами  $i$  та  $j$ , з яких перший індекс кільцевої зони ( $i=1 \dots N_r$ ), другий індекс сектора кільцевої зони ( $j=1 \dots N_i$ ). Координати початку кожного

променю можуть бути визначені в циліндричних координатах радіус-вектором  $\rho$  і кутом повороту  $\varphi$ :

$$\begin{cases} \rho_i = \Delta_r \left( i - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{int} \left( \frac{1}{i} \right) \right), \\ \phi_{ij} = \frac{360^\circ}{N_i} (j-1) + \alpha \end{cases},$$

де  $N_i$  – кількість радіальних зон у  $i$  – кільцевій зоні ( $i=1..N_r$ ),  $j$  – індекс радіальної зони ( $j=1..N_i$ ). Початковий кут повороту  $\alpha$  введений виключно з міркувань рівномірного заповнення перерізу променя вузловими точками (початковими координатами променів) і може бути представлений у вигляді:

$$\alpha = \left( \frac{360^\circ}{N_i} \Big|_{i=2} \& - \frac{360^\circ}{N_i} \Big|_{i=N_r} \right) \frac{1}{N_r-1} = \left( 90^\circ - \frac{180^\circ}{N_r} \right) \frac{1}{N_r-1}.$$

У декартовій системі координат:

$$\begin{cases} y_{ij} = \rho_i \cos(\phi_{ij}) \\ z_{ij} = \rho_i \sin(\phi_{ij}) \end{cases}$$

Потужність, що знімається з одного елементарного майданчика за весь час дії імпульсу, дорівнює:  $P_{ij} = \iint_{S_{ij}} I dS$ , де  $S_{ij}$  – площа елементарного майданчика. Однак інтеграл від функції виду (15) не може бути представлений у замкнутій формі. Для його обчислення, враховуючи, що крок по радіусу  $\Delta_r$  досить малий, можна скористатися теоремою про середнє значення подвійного інтеграла:

$$P_{ij} = S_{ij} \cdot I(y_{ij}, z_{ij}),$$

де  $I(y_{ij}, z_{ij})$  – значення інтенсивності у початковій точці променя. Тоді вся потужність імпульсу може бути розрахована за формулою.

$$P_\Sigma = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}.$$

Залишається визначити потужність, що знімається з елементарного майданчика за певний часовий проміжок  $\Delta t$  у середині всього імпульсу тривалістю  $\tau$ . Видно, що форма розподілу інтенсивності (15) визначається масштабним множником  $I_0$ , причому цей множник змінюється у часі, тобто вираз (15) можна записати, як:

$$I = I_0(t) \exp \left( -\frac{(y-y_c)^2}{\omega_y^2} - \frac{(z-z_c)^2}{\omega_z^2} \right).$$

Визначимо спад зниження інтенсивності (потужності) у вузлі  $R_{ij}$  відносно максимуму:

$$\mu_{ij} = \frac{I(y_c, z_c)}{I_{\max} \exp \left( -\frac{(y-y_c)^2}{\omega_y^2} - \frac{(z-z_c)^2}{\omega_z^2} \right)}.$$

Очевидно, що поточне значення потужності буде сумою потужностей, що переносяться кожним променем променевого пакета. Таким чином, потужність, що переноситься одним променем  $R_{ij}$  можна визначити, як:

$$P_{ij} = \frac{P(t_0)}{\Sigma_{\mu}} \mu_{ij},$$

де  $P(t_0)$  – поточне значення потужності в момент часу  $(t_0)$ ;  $\Sigma_{\mu} = \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_i} \mu_{ij}$ .

Також можна визначити кількість енергії, що виділилася за проміжок часу  $\Delta t$  та переноситься одним променем:

$$E_{ij} = \frac{P(t_0)}{\Sigma_{\mu}} \mu_{ij} \cdot \Delta t.$$

**Пройходження одиничного променя через оптичну систему.** Наведені вище положення щодо поширення лазерного випромінювання характеризують випромінювання поза межами резонатора. Тому для подальшого моделювання процесу необхідно розглянути перетворення променя оптичними елементами. Геометричні показники променя визначаються трьома параметрами перетворювальних елементів:

- кривизни поверхонь перетворювальних елементів;
- положення у просторі поверхонь перетворювальних елементів;
- коефіцієнти заломлення матеріалів перетворювальних елементів;

Оскільки поверхні в перетворювальних оптичних елементах або плоскі, або сферичні, розглянемо окремо поведінку одиничного променя при взаємодії з такими поверхнями.

**Пройходження променя через плоску поверхню.** Промінь може бути заданий трьома координатами початку  $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$  та трьома напрямними косинусами  $R = (X, Y, Z)$ . Тоді рівняння променя у векторній формі матиме вигляд:  $(r - r_1) \times R = 0$ , або в координатній формі:

$$\begin{cases} Yx - Xy = x_1Y - y_1X \\ Zy - Yz = y_1Z - z_1Y \end{cases} \quad (17)$$

Знайдемо координати точки зустрічі променя та площини,  $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ . Якщо площина задана вектором нормалі  $N = (X_N, Y_N, Z_N)$  і точкою початку вектора нормалі  $(x_n, y_n, z_n)$ , то рівняння площини, що проходить через  $r_2$ , має вигляд:

$$X_N x + Y_N y + Z_N z = X_N x_n + Y_N y_n + Z_N z_n. \quad (18)$$

Позначимо для компактності запису:

$$A_1 = x_1Y - y_1X, \quad A_2 = y_1Z - z_1Y, \quad A_3 = X_N x_n + Y_N y_n + Z_N z_n.$$

Координати точки зустрічі променя та площини є рішенням системи (17) та (18). За методом визначників:

$$\begin{aligned} D &= \begin{vmatrix} Y & -X & 0 \\ 0 & Z & -Y \\ X_N & Y_N & Z_N \end{vmatrix} = YZZ_N + XYX_N + Y^2Y_N \\ D_1 &= \begin{vmatrix} A_1 & -X & 0 \\ A_2 & Z & -Y \\ A_3 & Y_N & Z_N \end{vmatrix} = A_1ZZ_N + XYA_3 + A_1YY_N + XA_2Z_N \\ D_2 &= \begin{vmatrix} Y & A_1 & 0 \\ 0 & A_2 & -Y \\ X_N & A_3 & Z_N \end{vmatrix} = YA_2Z_N - A_1YX_N + Y^2A_3 \end{aligned} \quad (19)$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} Y & -X & A_1 \\ 0 & Z & A_2 \\ X_N & Y_N & A_3 \end{vmatrix} = YZA_3 - XA_2X_N - A_1ZX_N - YA_2Y_N$$

$$x_2 = \frac{D_1}{D}; y_2 = \frac{D_2}{D}; z_2 = \frac{D_3}{D}.$$

Напрямок заломленого променя  $(X_2, Y_2, Z_2)$  знаходиться із закону заломлення:

$$(\vec{q}' - \mu\vec{q}) \times \vec{g} = 0,$$

де  $\vec{q}$  – падаючий промінь;

$\vec{q}'$  – заломлений промінь;

$\vec{g}$  – вектор нормалі;

$\mu = \frac{n}{n'}$ ,  $n$ ,  $n'$  – відповідно відносні показники заломлення середовища падаючого променя і середовища заломленого променя.

Оскільки добуток векторів  $(\vec{q}' - \mu\vec{q})$  і  $\vec{g}$  дорівнює нулю, ці вектори колінеарні, тобто відрізняються лише деяким скалярним множником  $\Gamma$ :  $\vec{q}' = \mu\vec{q} + \Gamma\vec{g}$ . Помноживши скалярний вираз (3.4) на  $\vec{g}$ , отримаємо:

$$\Gamma = \frac{c' - \mu c}{\|\vec{g}\|},$$

де  $c' = \|\vec{g}\| \cos \alpha'$ ,  $c = \|\vec{g}\| \cos \alpha$ . Тут  $\alpha$  і  $\alpha'$  – відповідно кут падіння та кут заломлення. Тоді:

$$c = \|\vec{g}\| \frac{XX_N + YY_N + ZZ_N}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \sqrt{X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2}};$$

$$c'^2 = \|\vec{g}\|^2 - \mu^2 (\|\vec{g}\|^2 - c^2), c' = +\sqrt{c^2 - \mu^2 (\|\vec{g}\|^2 - c^2)};$$

$$\begin{cases} X_2 = \mu \cdot X + \Gamma X_N \\ Y_2 = \mu \cdot Y + \Gamma Y_N \\ Z_2 = \mu \cdot Z + \Gamma Z_N \end{cases}.$$

**Проходження променя через сферичну поверхню.** Визначимо спочатку координати точки зустрічі променя та сферичної поверхні. Рівняння сфери запишемо у вигляді:

$$al^2 - 2bl + p = 0,$$

де  $l$  – відстань від початку променя до точки зустрічі;

$a = \rho_0$ , де  $\rho_0$  – кривизна поверхні:  $\rho_0 = 1/r$ .

$$b = X - \rho_0(xX + yY + zZ),$$

де  $(x, y, z)$  – координати вектора променя;  $(X, Y, Z)$  – напрямні косинуси вектора променя;

$$p = \rho_0(x^2 + y^2 + z^2) - 2x;$$

$$l = \frac{b - c}{a},$$

де  $c = \sqrt{b^2 - ap}$ , або

$$l = \frac{p}{b + \sqrt{b^2 - ap}}.$$

Тоді координати точки зустрічі променя та сфери можна визначити, як:

$$\begin{cases} x'_m = x + lX \\ y'_m = y + lY \\ z'_m = z + lZ \end{cases}.$$

Нехай у декартовій системі координат вектор променя  $R$  заданий координатами початку вектора  $(x'_1, y'_1, z'_1)$  та напрямними косинусами  $(X, Y, Z)$ . Нехай центр сфери радіусом  $r$  знаходиться у точці з координатами  $(x'_c, y'_c, z'_c)$ . Тоді початок координат у системі Федера розташовано у точці  $(x'_c - r, y'_c, z'_c)$ , а центр сфери в координатах Федера – у точці  $(r, 0, 0)$ . Для переходу в систему координат необхідно перетворити координати вектора променя так, що  $x = x' - x'_c + r$ ,  $y = y' - y'_c$ ,  $z = z' - z'_c$ . Після знаходження точки зустрічі променя з поверхнею  $(x'_m, y'_m, z'_m)$  та розрахунку параметрів заломленого променя, необхідно провести перетворення отриманих координат:  $x_m = x'_m + x'_c - r$ ,  $y_m = y'_m + y'_c$ ,  $z_m = z'_m + z'_c$ .

Напрямок заломленого променя  $R_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$  знайдемо так само, як і у випадку з площиною, враховуючи, що довжина вектора нормалі

$$\|g\| = \sqrt{(r - x'_m)^2 + y'^2_m + z'^2_m},$$

а його напрямки

$$\left( \frac{r - x'_m}{\|g\|}, \frac{-y'_m}{\|g\|}, \frac{-z'_m}{\|g\|} \right)$$

або  $(X_N, Y_N, Z_N)$ .

Тоді

$$\Gamma = \frac{c' - \mu c}{\|g\|^2};$$

$$c'^2 = \|g\|^2 - \mu^2 (\|g\|^2 - c^2);$$

$$\vec{R}_2 = \mu \vec{R} + \Gamma \vec{g}.$$

**Віддзеркалення променя від плоскої поверхні.** Нехай промінь заданий координатами початку  $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$  та напрямними косинусами  $R = (X, Y, Z)$ . Косинус кута між векторами променя і нормалі дорівнює

$$\cos \alpha = \frac{XX_N + YY_N + ZZ_N}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \sqrt{X_N^2 + Y_N^2 + Z_N^2}}$$

де  $N = (X_N, Y_N, Z_N)$  вектор нормалі.

Довжина падаючого променя:

$$L_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

Довжина вектора, протилежного вектору нормалі, який складав би із вектором  $R$  прямокутний трикутник, дорівнює:

$$\|g'\| = \cos \alpha \cdot L_1,$$

де  $(x_2, y_2, z_2)$  – координати точки зустрічі променя з поверхнею, способи знаходження яких для площини і сфери описані вище. Тоді напрямок вектора відбитого променя можна визначити так:  $\vec{R}_2 = \vec{R}_1 + 2\vec{g}'$ , або

$$\begin{cases} X_2 = L_1 X - 2\|g'\| X_N \\ Y_2 = L_1 Y - 2\|g'\| Y_N \\ Z_2 = L_1 Z - 2\|g'\| Z_N \end{cases}.$$

**Операції над оптичними елементами.** Під операціями над оптичними елементами розумітимемо переміщення та обертання цих елементів.

Переміщення визначається вектором переміщень  $D = (D_X, D_Y, D_Z)$ , де  $D_i$  – величина зміщення по кожній з осей. Для отримання координат нового положення оптичного елемента необхідно до старих додати величину зміщення.

Для завдання повороту необхідно задати кут обертання, вісь обертання та координати точки, розташованої на осі обертання.

Кут повороту навколо кожної з осей координат можна задати як матриці повороту  $\Phi$ . Тоді напрямок поверненого вектора буде  $\vec{X}' = \Phi \vec{X}$ , де  $\vec{X}$  – початковий вектор. Матриці повороту навколо осей координат мають вигляд:

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_x & \sin\alpha_x \\ 0 & -\sin\alpha_x & \cos\alpha_x \end{pmatrix} \\ \Phi_y &= \begin{pmatrix} \cos\alpha_y & 0 & -\sin\alpha_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha_y & 0 & \cos\alpha_y \end{pmatrix} \\ \Phi_z &= \begin{pmatrix} \cos\alpha_z & \sin\alpha_z & 0 \\ -\sin\alpha_z & \cos\alpha_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

де  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – кути повороту навколо осей  $X, Y, Z$ . Тоді матриця повороту матиме вигляд:

$$\Phi = \Phi_x \Phi_y \Phi_z. \quad (20)$$

Для знаходження координат точки початку вектора після повороту можна скористатися виразом:  $r_1' = \Phi(r_1 - d)$ , де  $\Phi$  – матриця повороту, описана у виразах (19-20);  $r_1$  – вихідні координати точки початку вектора;  $r_1'$  – координати точки початку вектора після повороту;  $d = (x_d, y_d, z_d)$  – радіус-вектор, що вказує на початок координат системи, щодо якої здійснюється поворот;

Таким чином, ми отримали для кожного з променів у променевому пакеті напрямки розповсюдження, початкові координати й енергію, що переноситься одиничний довільним променем  $R_{ij}$ . Також отримана модель перетворення всього променя оптичною системою, яке можна розглядати з погляду проходження окремих променів пакета через, як правило, плоскі та сферичні поверхні, або відбиття від них. За таких умов досить легко можна знайти всі промені, що потрапляють на поверхню контрольного об'єму на границі

тіла, що нагрівається і, з урахуванням оптичних характеристик поверхні, визначити кількість теплоти, що передається контрольному об'єму поверхні.

$$Q_A = \sum_{k=1}^m A(T) E_{ijk}.$$

Тоді підвищення температури в такому контрольному обсязі можна виразити через масу і теплоємність:

$$\Delta T = \frac{Q_A}{cm}.$$

Значення  $\Delta T$  можна використовувати для завдання температури на границі в різнице-вих схемах методу кінцевих об'ємів (тобто, як умову Діріхле).

**Зворотна теплова задача при лазерному згинанні.** Моделювання процесу формування загалом складається з двох частин: вирішення задачі теплопровідності для отримання інформації про розподіл температури в зоні обробці, та вирішення задачі про деформування заготовки в результаті нагрівання.

Залежно від конкретних обставин і потрібної точності, теплова задача може вирішуватися різними способами, як інтегруванням рівняння теплопровідності, так і чисельними методами: методами кінцевих різниць, кінцевих елементів або кінцевих об'ємів.

Для моделювання безпосередньо процесів формування лазерним променем можуть бути використані декілька механізмів термічного формування, зокрема механізм градієнта температури.

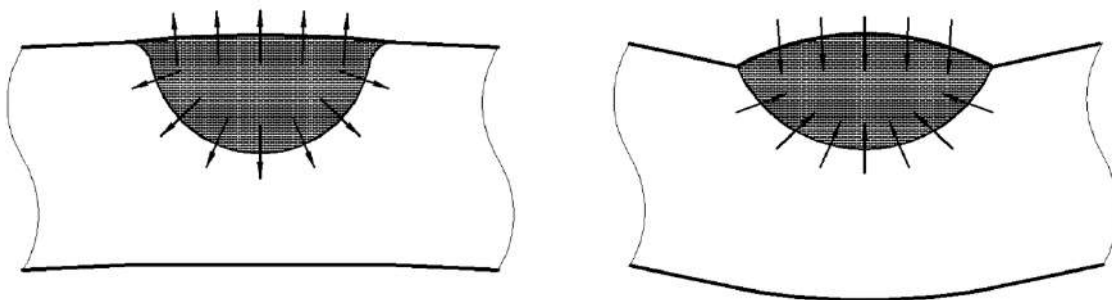


*Рис. 4. Стадії формування згину при механізмі градієнта температури: зустрічне згинання і вигин [25]*

Механізм градієнта температури [26, 27] - це механізм термічного формування, який в основному використовується для згинання та формування листового металу. Принципи дії цього механізму показаний на рис. 4.

Енергія лазерного променя локально поглинається верхньою поверхнею зразка. Це викликає градієнт температури по товщині зразка в зоні опромінення. Завдяки позитивному коефіцієнту теплового розширення більшості матеріалів теплове розширення в опроміненій області на верхній стороні листа більше, ніж розширення нижньої сторони. Різні розширення викликають згинання листа від лазерного променя. Цей вигин не є вільним, оскільки опромінена область зафіксована всередині навколишніх частин зразка. Таким чином, в опроміненій області зразка виникає напруження, яке стискає з верхньої сторони. Крім того, затискання зразка може посилити цей ефект. Якщо це термічне напруження залишається нижче межі текучості матеріалу, яка змінюється через локальну зміну температури, деформація зразка є повністю пружною. Після припинення дії лазерного випромінювання і охолодження зразка деформація в цьому випадку не залишається. Якщо, навпаки, локальна напруга перевищує залежну від температури межу текучості в опроміненій області на



верхній стороні листа, відбувається локальне висаджування матеріалу. Це означає, що верхня сторона області опромінення пластично деформована. Після охолодження зразка теплове розширення опромінюваної області зникає і зберігається пластична деформація верхньої сторони. Це призводить до вигину зразка в бік лазерного променя.

Модель шукатимемо у вигляді [28]:

$$y^{(m)} = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_i^{(2)} x_i^2 + \dots + \sum b_i^{(m)} x_i^m + \dots + \sum b_{i(k)j(l)} x_i^k x_j^l, \quad (20)$$

де  $m$  – ступінь полінома,  $b$  – невідомі коефіцієнти полінома, всі ступені всіх факторів комбінуються між собою.

Спочатку методом найменших квадратів знаходяться коефіцієнти полінома. На першому етапі всі вони вважаються значущими, тобто суттєво впливають на вихідну величину. Для такого виду полінома розраховуємо оцінку максимальної правдоподібності

$$R_s = \frac{\sum (y_i - f_i)^2}{n - N_c}.$$

Надалі нашою метою буде саме мінімізація  $R_s$ .

Далі кожен зі складників перевіряється на значущість. Фактори або їх комбінації по одному видаляються з моделі й після кожного видалення розраховуються  $R_s$ . Якщо на черговому кроці він не зменшився, фактор повертають до моделі, і навпаки [29].

Особливістю запропонованого методу є спроби повернути раніше відкинуті фактори до моделі, також за допомогою розрахунку  $R_s$ . Попри неочевидність третього етапу, все ж стверджуємо його необхідність, яка була підтверджена практично.

Таким чином знаходимо оптимальну форму полінома для ступеня  $m$  за критерієм мінімізації  $R_s$ . Далі збільшуємо ступінь на одиницю та генеруємо модель для ступеня  $m + 1$  та повторюємо попередні етапи. В результаті маємо два конкуруючих значення  $R_s$ .

Якщо виконується умова закінчення  $R_s^{(m+1)} > R_s^{(m)}$ , то остаточно приймаємо форму і ступінь полінома  $m$ , в іншому випадку збільшуємо ступінь на одиницю і повторюємо попередні етапи.

Такий підхід дозволяє знайти зв'язок між параметрами, що визначають температурне поле, та деформаціями, причому у відносно простій формі полінома. Виділивши ті фактори що піддаються керуванню, можна вирішити зворотну задачу, коли за необхідними параметрами виробу (кут згину за один прохід, зона термічного впливу тощо) можна визначити діапазон технологічних параметрів обладнання, які забезпечують відповідні параметри виробу.

Така задача вирішувалася для зразка зі сталі 65Г (AISI 1566) завтовшки 2 мм, яку необхідно було нагріти до 1200 °С. Як змінні фактори були обрані три: поглинута потужність випромінювання  $P_0$ , радіус джерела теплоти  $r_0$  та швидкість руху джерела теплоти поверхнею.

Кожен з факторів змінювався на 5 рівнях, що дало 125 розрахункових точок. Розрахунок температур проводився за наведеною вище прямою задачею лазерного нагрівання (1-19). Далі отримані результати служили основою для розрахунку невідомих коефіцієнтів моделі (20).

Перед оцінюванням невідомих коефіцієнтів фактори кодувалися, значущість факторів  $R_i$  оцінювалася:

$$R_i = \frac{(y_{\max} - y_{\min}) \cdot \bar{x}}{(x_{\max} - x_{\min}) \cdot \bar{y}}. \quad (21)$$

Таке співвідношення дозволило оцінити ступінь впливу кожного з факторів і відповідно обрати межі кодованих величин так, щоби однакова зміна будь-якого з факторів призводила би до приблизно однакової зміни вихідної величини. Далі визначалися рівні факторів:

$$x_i = \frac{R_i \cdot (y_i - \bar{y})}{(y_{\max} - y_{\min})}.$$

Діапазони варіювання факторів і їх кодовані за (21) величини наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Діапазони варіювання факторів і їх кодовані значення

| $P_0$          |                   | $r_0$                   |                   | $V$               |                   |
|----------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Потужність, Вт | Кодоване значення | Радіус фокусування, см. | Кодоване значення | Швидкість, см/сек | Кодоване значення |
| 400            | -1                | -1,15                   | 0,5               | -1,14             | 0,83              |
| 450            | -0,5              | -0,575                  | 0,75              | -0,57             | 1,25              |
| 500            | 0                 | 0                       | 1                 | 0                 | 1,67              |
| 550            | 0,5               | 0,575                   | 1,25              | 0,57              | 2,08              |
| 600            | 1                 | 1,15                    | 1,5               | 1,14              | 2,5               |

Етапи побудови полінома (табл. 2).

Таблиця 2 – Етапи побудови полінома виду (20)

| Ступінь полінома | Оцінка максимальної правдоподібності, $R_s$ | Кількість коефіцієнтів | Максимально можлива кількість коефіцієнтів |
|------------------|---------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| 1                | 628,75                                      | 4                      | 4                                          |
| 2                | 228,42                                      | 9                      | 10                                         |
| 3                | 72,79                                       | 16                     | 20                                         |
| 4                | 20,36                                       | 25                     | 35                                         |
| 5                | 5,03                                        | 34                     | 56                                         |
| 6                | 1,07                                        | 42                     | 84                                         |

З табл. 2 видно, що ступені 1-3 дають недостатній рівень точності, 4 – задовільний, 5 – хороший і 6 – надмірний.

Звичайно, отримане рішення буде не єдиним в тому сенсі, що за побудованою моделлю одну і ту саму температуру можна отримати за різних наборів вхідних даних, тобто модель має незадіяні ступені свободи. Їх можна витратити, зафіксувавши деякі з факторів на рівнях обраних з третіх міркувань (можливості обладнання, тощо). У нашому прикладі були зафіксовані два фактори, а саме  $r_0 = 1$  мм,  $V = 1$  м/хв. Розрахунок за отриманою моделлю дав необхідне значення ефективної потужності 494 Вт, перевіірочний розрахунок за методом кінцевих різниць – 508 Вт, тобто дуже близькі значення.

При одночасному збільшенні кількості факторів та порядку моделі складність останньої буде швидко зростати, тому виникає необхідність цю складність понизити. При побудові моделі був помічений тісний зв'язок між радіусом фокусування та швидкістю руху променя [30], тому для спрощення моделі їх пов'язали з властивістю матеріалу у комплексний безрозмірний параметр:

$$x_2 = \frac{V \cdot r_0}{4a}.$$

Фактор  $x_1$  так і залишився за потужністю. Результати моделювання наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти полінома (20) для двох факторів

| Фактори | Ступінь апроксимуючого полінома |          |          |          |          |          |          |
|---------|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|         | 1                               | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        |
| 1       | 2                               | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        |
| $x_0$   | 2214,705                        | 2057,686 | 2020,503 | 2043,244 | 2055,174 | 2051,853 | 2049,687 |
| $x_1$   | 257,331                         | 257,331  | 239,087  | 234,766  | 237,409  | 238,795  |          |
| $x_2$   | -2656,4                         | -3262,44 | -2653,42 | -2320,52 | -2442,05 | -2557,41 | -2516,31 |

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

|             |  |          |          |          |          |          |          |
|-------------|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $x_1 x_2$   |  | -308,653 | -379,07  | -308,306 | -269,626 | -283,747 | -297,151 |
| $x_2^2$     |  | 4987,882 | 7496,894 | 5606,533 | 3849,988 | 4404,882 | 5094,673 |
| $x_1^3$     |  |          |          |          |          |          | 402,333  |
| $x_1 x_2^2$ |  |          | 579,552  | 871,079  | 651,435  | 447,338  |          |
| $x_2^3$     |  |          | -10928,6 | -19159,6 | -13473   | -6008,29 | -9342,95 |
| $x_1 x_2^3$ |  |          |          | -1269,82 | -2226,2  | -1565,46 | -698,116 |
| $x_2^4$     |  |          |          | 25926,58 | 52713,47 | 33485,33 | 5034,451 |
| $x_1^5$     |  |          |          |          |          |          | -108,635 |

Закінчення таблиці 3

|                               |                |               |               |               |              |              |              |
|-------------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1                             | 2              | 3             | 4             | 5             | 6            | 7            | 8            |
| $x_1^3 x_2^2$                 |                |               |               |               |              |              | 863,721      |
| $x_1 x_2^4$                   |                |               |               |               | 3012,462     | 6124,886     | 3890,729     |
| $x_2^5$                       |                |               |               |               | -68833       | -155456      | -74670,3     |
| $x_1 x_2^5$                   |                |               |               |               |              | -7997,85     | -18062,7     |
| $x_2^6$                       |                |               |               |               |              | 203833,7     | 473842       |
| $x_1^5 x_2^2$                 |                |               |               |               |              |              | -233,215     |
| $x_1 x_2^6$                   |                |               |               |               |              |              | 23683,85     |
| $x_2^7$                       |                |               |               |               |              |              | -661898      |
| <b><math>R_s</math></b>       | <b>204,586</b> | <b>86,197</b> | <b>37,057</b> | <b>15,811</b> | <b>6,569</b> | <b>2,299</b> | <b>0,737</b> |
| <b>Кількість коефіцієнтів</b> | <b>3</b>       | <b>5</b>      | <b>7</b>      | <b>9</b>      | <b>11</b>    | <b>13</b>    | <b>17</b>    |

Видно, що складність моделі помітно зменшилася без зменшення точності. Як і у попередньому випадку, ступені 1-3 дають недостатній рівень точності, 4 - задовільний, 5 – хороший і 6,7 – надмірний.

**Висновки.** Розроблено чисельну модель для вирішення зворотної задачі теплопровідності, яка дозволяє визначати керовані технологічні параметри обладнання для досягнення потрібного розподілу температур у матеріалі під час лазерної обробки. Запропонований метод вирішення зворотної задачі теплопровідності дозволяє регулювати точність вирішення, яка загалом залежить від якості прямої моделі. Запропонована пряма модель, яка дозволяє докладно представити процес взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом і проводити розрахунки з достатньою точністю в тому числі для матеріалів з нелінійними теплофізичними властивостями.

Серед певних недоліків запропонованого підходу можна відмітити певне спрощення умов нагрівання: використання умови Діріхле замість умови Неймана може не враховувати всі особливості конвективного і променевого теплообміну на поверхні. Для високої точності моделювання потрібні малі кроки дискретизації, що значно збільшує обчислювальну складність. Нелінійність залежності теплопровідності та теплоємності від температури враховувалася наближено, що могло впливати на точність при високих температурах.

Практичне значення результатів полягає в тому, що модель дозволяє оптимізацію параметрів лазерної обробки: прогнозувати оптимальні значення потужності, швидкості та діаметра променя для досягнення бажаних результатів.

Наступним кроком у можливішому розвитку такого підходу бачиться розширення моделі для врахування багатофазних процесів, таких як плавлення, випаровування та утворення плазми.

Модель застосовувалася для випадків нагрівання без фазового переходу на поверхні (лазерна поверхнева обробка, лазерне формування), тому як розширення її застосування можна розглядати інші технології, включаючи зварювання та розмірну обробку.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації параметрів лазерної обробки, підвищення ефективності технологічних процесів та покращення якості оброблених матеріалів.

## Список використаних джерел

1. Nakamura, T., et al. (2014). Inverse analysis for transient thermal load identification and application to aerodynamic heating on atmospheric reentry capsule. *Aerospace Science and Technology*.
2. Duda, P. (2015). Numerical and experimental verification of two methods for solving an inverse heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
3. Jarny, Y., et al. (1991). A general optimization method using adjoint equation for solving multi-dimensional inverse heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
4. Beck, J. V. (1970). Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
5. Komínek, J., & Pohanka, M. (2016). Estimation of the number of forward time steps for the sequential Beck approach used for solving inverse heat-conduction problems. *Materiali in Tehnologije*, 50(2), 207–210.
6. Duda, P. (2016). A general method for solving transient multidimensional inverse heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 665–673.
7. Hao, M., & Sun, Y. (2013). A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 352–360.
8. Wang, S., Deng, Y., & Sun, X. (2018). Solving of two-dimensional unsteady inverse heat conduction problems based on boundary element method and sequential function specification method. *Complexity*, 2018.
9. Monde, M. (2000). Analytical method in inverse heat transfer problem using Laplace transform technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
10. Huang, C. H., et al. (1999). A three-dimensional inverse heat conduction problem in estimating surface heat flux by conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
11. Zhou, J., et al. (2010). Inverse estimation of surface heating condition in a three-dimensional object using conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
12. Burggraf, O. R. (1964). An exact solution of the inverse problems in heat conduction theory and application. *ASME Journal of Heat Transfer*.
13. Langford, D. (1976). New analytical solutions of the one-dimensional heat equation for temperature and heat flow rate both prescribed at the same fixed boundary (with applications to the phase change problem). *Quarterly of Applied Mathematics*.
14. Zhou, J., Zhang, Y., Chen, J. K., & Feng, Z. C. (2012). Inverse estimation of front surface temperature of a plate with laser heating and convection–radiation cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 52, 22–30.
15. Bozzoli, F., Mocerino, A., Rainieri, S., & Vocale, P. (2018). Inverse heat transfer modeling applied to the estimation of the apparent thermal conductivity of an intumescent fire-retardant paint. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90.
16. Segall, A. E. (2005). An inverse solution for determining arbitrary boundary conditions using a least-square approach. *ASME Journal of Heat Transfer*.
17. Dong, C. F., Sun, F. Y., & Meng, B. Q. (2007). A method of fundamental solutions for inverse heat conduction problems in an anisotropic medium. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31(1), 75–82.
18. Zhang, B., Mei, J., Cui, M., Gao, X.-W., & Zhang, Y. (2019). A general approach for solving three-dimensional transient nonlinear inverse heat conduction problems in irregular complex structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140.
19. Катрич, В. О., Майборода, Д. В., Погарський, С. О., & Просвірнін, С. Л. (2011). *Чисельні методи в прикладній фізиці*. Харків: Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна.
20. Мейтленд, А., & Данн, М. (1978). *Введення у фізику лазерів*. Москва: Наука.
21. Schwarzenbach, A. P., & Ladrach, P. (1995). *Recent progress in laser processing*. In *Proceedings of the International Symposium for Electro-Machining (ISEM)*. EPFL, Lausanne, Switzerland.
22. Байбородін, Ю. В. (1977). *Введення в лазерну техніку*. Київ: Техніка.
23. Anan'ev, Y. A. (1992). *Laser resonators and the beam divergence problem* (Series on Optics and Optoelectronics). Taylor & Francis.
24. Shannon, R. (1997). *The art and science of optical design*. Cambridge University Press.

25. Козирєв, О. С., Кагляк, О. Д., & Чухліб, С. В. (2024). Моделювання процесу нагрівання при лазерному згинанні. In *Матеріали XIV міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»* (Т. 1, с. 161–162).
26. Pretorius, T. (2009). *Laser forming*. In *The theory of laser materials processing* (Springer Series in Materials Science, pp. 281–314). Springer.
27. Vollertsen, F. (1994). An analytical model for laser bending. *Lasers in Engineering*, 2, 261–276.
28. Козирєв, О. С., & Луценко, Д. В. (2021). Ітераційний підхід при розв'язанні зворотної задачі теплопровідності. In *КЗЯТПС – 2021 : матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції* (Т. 1, с. 160–162). Національний університет «Чернігівська політехніка».
29. Козирєв, О. С., Кагляк, О. Д., & Ритіков, Є. О. (2024). Зворотна теплова задача при лазерному згинанні. In *Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»* (Т. 1, с. 159–161). Чернігів.
30. Коваленко, В. С., Головка, Л. Ф., & Черненко, В. С. (1990). *Зміцнення та легування деталей машин променем лазера*. Техніка.

### References

1. Nakamura, T., et al. (2014). Inverse analysis for transient thermal load identification and application to aerodynamic heating on atmospheric reentry capsule. *Aerospace Science and Technology*.
2. Duda, P. (2015). Numerical and experimental verification of two methods for solving an inverse heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
3. Jarny, Y., et al. (1991). A general optimization method using adjoint equation for solving multi-dimensional inverse heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
4. Beck, J. V. (1970). Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conduction problem. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
5. Komínek, J., & Pohanka, M. (2016). Estimation of the number of forward time steps for the sequential Beck approach used for solving inverse heat-conduction problems. *Materiali in Tehnologije*, 50(2), 207–210.
6. Duda, P. (2016). A general method for solving transient multidimensional inverse heat transfer problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 665–673.
7. Hao, M., & Sun, Y. (2013). A FEM model for simulating temperature field in coaxial laser cladding of Ti6Al4V alloy using an inverse modeling approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 352–360.
8. Wang, S., Deng, Y., & Sun, X. (2018). Solving of two-dimensional unsteady inverse heat conduction problems based on boundary element method and sequential function specification method. *Complexity*, 2018.
9. Monde, M. (2000). Analytical method in inverse heat transfer problem using Laplace transform technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
10. Huang, C. H., et al. (1999). A three-dimensional inverse heat conduction problem in estimating surface heat flux by conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
11. Zhou, J., et al. (2010). Inverse estimation of surface heating condition in a three-dimensional object using conjugate gradient method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
12. Burggraf, O. R. (1964). An exact solution of the inverse problems in heat conduction theory and application. *ASME Journal of Heat Transfer*.
13. Langford, D. (1976). New analytical solutions of the one-dimensional heat equation for temperature and heat flow rate both prescribed at the same fixed boundary (with applications to the phase change problem). *Quarterly of Applied Mathematics*.
14. Zhou, J., Zhang, Y., Chen, J. K., & Feng, Z. C. (2012). Inverse estimation of front surface temperature of a plate with laser heating and convection–radiation cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 52, 22–30.
15. Bozzoli, F., Mocerino, A., Rainieri, S., & Vocale, P. (2018). Inverse heat transfer modeling applied to the estimation of the apparent thermal conductivity of an intumescent fire-retardant paint. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 90.
16. Segall, A. E. (2005). An inverse solution for determining arbitrary boundary conditions using a least-square approach. *ASME Journal of Heat Transfer*.

17. Dong, C. F., Sun, F. Y., & Meng, B. Q. (2007). A method of fundamental solutions for inverse heat conduction problems in an anisotropic medium. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 31(1), 75–82.
18. Zhang, B., Mei, J., Cui, M., Gao, X.-W., & Zhang, Y. (2019). A general approach for solving three-dimensional transient nonlinear inverse heat conduction problems in irregular complex structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140.
19. Katrych, V. O., Maiboroda, D. V., Poharskyi, S. O., Prosvirnin, S.L. (2011). *Chyselni metody v prykladnii fizytsi [Numerical methods in applied physics]*. Kharkivskyi natsionalnyi universytet imeni V. N. Karazina.
20. Meitlend A., Dann M. (1978). *Vvedennia u fizyku lazeriv [Introduction to laser physics]*. Nauka.
21. Schwarzenbach, A.P., Ladrach, P. (1995). Recent Progress in Laser Processing. *Proceedings of International Symposium for ElectroMachining, EPFL, Lausanne, Switzerland*.
22. Baiborodin, Yu. V. (1977). *Vvedennia v lazernu tekhniku [Introduction to laser technology]*. Tekhnika.
23. Ananov, Y. A. (1992). *Laser Resonators and the Beam Divergence Problem (Series on Optics and Optoelectronics)*. Taylor & Francis.
24. Shannon, R. (1997). *The Art and science of optical design*. Cambridge University Press.
25. Kozyriev, O. S., Kahliak, O. D., Chukhlib, S. V. (2024). Modeliuvannia protsesu nahrivannia pry lazernomu zghynanni [Modelling the heating process during laser bending]. *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system: XIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii – Comprehensive Quality Assurance of Technological Processes and Systems: XIV International Scientific and Practical Conference* (Vol. 1, pp. 161-162).
26. Pretorius, T. (January 2009). Laser Forming. The Theory of Laser Materials Processing. Springer Series in Materials Science (pp. 281–314).
27. Vollertsen, F. (1994). An Analytical Model for Laser Bending. *Lasers in Engineering*, 2, 261-276.
28. Kozyriev, O. S., Lutsenko, D. V. (2021). Iteratsiyni pidkhid pry rozv'iazanni zvorotnoi zadachi teploprovodnosti [Iterative approach to solving the inverse heat conduction problem]. *KZlaTPS – 2021: XI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia – KZlaTPS – 2021: XI International Scientific and Practical Conference* (Vol. 1, pp. 160–162).
29. Kozyriev, O. S., Kahliak, O. D., Rytikov, Ye. O. (2024). Zvorotna teplova zadacha pry lazernomu zghynanni [Reverse heat problem in laser bending]. *KZlaTPS – 2024: XIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - KZlaTPS – 2024: XIV International Scientific and Practical Conference* (Vol. 1, pp. 159–161).
30. Kovalenko, B. C., Holovko, L. F., Chernenko, B. C. (1990). *Zmitsnennia ta lehuвання detalei mashyn promenem lazera [Hardening and alloying of machine parts with a laser beam]*. Tekhnika.

Дата першого надходження статті до видання: 05.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.12.2025

UDC 621.326

**Oleksii Kozyriev<sup>1</sup>, Oleksii Kaglyak<sup>2</sup>, Maksym Romanenko<sup>3</sup>,  
Viktor Dubnyuk<sup>4</sup>, Yuriy Klychnykov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Senior Lecturer of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [kozyriev.oleksii@ill.kpi.ua](mailto:kozyriev.oleksii@ill.kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5385-8578>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [kaglyak.olexa@gmail.com](mailto:kaglyak.olexa@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5602-543X>

<sup>3</sup>PhD student of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [m.romanenko@kpi.ua](mailto:m.romanenko@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8803-2278>

<sup>4</sup>Senior Lecturer of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [v.dubniuk@kpi.ua](mailto:v.dubniuk@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6146-9265>

<sup>5</sup> PhD in Physical and Mathematical Sciences,

Associate Professor of the Department of Laser Systems and Advanced Technologies

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

E-mail: [yu.klyuchnikov@gmail.com](mailto:yu.klyuchnikov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1970-6340>

## MODELING OF LASER HEATING PROCESSES IN METALS BASED ON THERMAL FIELD ANALYSIS

*In laser thermal processing, welding, cladding, surface hardening, and laser bending, it is the temperature fields that determine the development of phase transformations, the material's microstructure, and the formation of residual stresses and deformations. Proper design of these processes requires models capable of adequately reproducing the thermal behavior of metals. Modern trends in laser technologies — including additive manufacturing and precision processing — demand increased accuracy in mathematical modeling.*

*Formulating the inverse heat conduction problem (IHCP) with Neumann boundary conditions and nonlinear thermophysical properties in a 3-D configuration has been scarcely addressed, even though this type of boundary condition (prescribed heat flux on the surface) is inherent to laser heating problems. Therefore, there is a need to develop a numerical method for solving the inverse heat conduction problem based on thermal field analysis to determine the technological parameters of laser equipment required to achieve the desired output characteristics of material processing.*

*A numerical model is proposed that links the energy delivered by the laser beam, the material's thermophysical properties, and the heat-transfer conditions with the thermal action of the radiation. In addition, an inverse model is introduced that relates temperature-field parameters to the technological settings of the laser system. The proposed method for solving the inverse heat conduction problem makes it possible to control the solution accuracy, which generally depends on the quality of the direct model. The direct model presented here enables detailed representation of the interaction between laser radiation and the material and allows sufficiently accurate calculations, including for materials with nonlinear thermophysical properties.*

*The practical significance of the results lies in the model's capability to optimize laser-processing parameters: predicting optimal values of power, beam speed, and spot diameter to achieve the desired outcomes. The model has been applied to heating processes without surface phase transitions (laser surface treatment, laser forming), and thus its extension to other technologies — including welding and precision machining — can be considered. The research results may be used to optimize laser-processing parameters, improve the efficiency of technological processes, and enhance the quality of treated materials.*

**Keywords:** laser heating; thermal conductivity; inverse heat conduction problem; numerical simulation; temperature field; laser heat treatment.

Fig. 4. Table 3. References: 30.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-122-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-122-126)

УДК 378.147:744.4

**Ірина В'ячеславівна Нагорна**

старший викладач кафедри технологій зварювання та будівництва  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [irynanahorna@stu.cn.ua](mailto:irynanahorna@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5075-8712>  
ResearcherID: M-4382-2019, Scopus Author ID: 57192820279

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

*У роботі досліджено особливості викладання інженерної та комп'ютерної графіки в українських закладах вищої освіти в умовах воєнного стану. Розглянуто вплив дистанційного та змішаного навчання на формування графічних компетентностей здобувачів вищої освіти, окреслено основні методичні виклики та шляхи їх подолання. Обґрунтовано доцільність поєднання традиційних методів креслення з використанням CAD-систем, зокрема AutoCAD, а також підкреслено роль цифрових освітніх платформ і зворотного зв'язку у забезпеченні якості навчального процесу.*

**Ключові слова:** інженерна графіка; комп'ютерна графіка; дистанційне навчання; змішане навчання; AutoCAD; CAD-системи.

Бібл.: 5.

**Актуальність теми дослідження.** Воєнний стан в Україні став безпрецедентним викликом для всієї системи освіти. Особливо гостро трансформації торкнулися галузей, пов'язаних із точними науками, технікою та проєктуванням. Викладання інженерної та комп'ютерної графіки, яке базується на систематичній практиці, розвитку просторового мислення й опануванні сучасних CAD-технологій, потребує не лише методичного оновлення, але й переосмислення ключових педагогічних підходів.

З початком повномасштабної агресії значна частина закладів освіти перейшла на дистанційний або змішаний режим роботи. За дослідженнями провідних українських вчених, навчання в умовах стресу, нестабільності та обмеженого доступу до ресурсів змінює як поведінкові моделі здобувачів, так і педагогічні стратегії викладачів. Це особливо помітно на графічних дисциплінах, де необхідні висока точність, системне мислення та безперервний зворотний зв'язок.

Актуальність даного дослідження зумовлюється потребою адаптації методик викладання інженерної графіки до умов нестабільного навчального середовища, що характеризується обмеженим доступом до матеріально-технічної бази та частими перебоями з електропостачанням. Це сприяє формуванню методичних засад стійкої технічної освіти, що відповідає сучасним викликам і забезпечує підготовку конкурентоспроможних фахівців, здатних до відновлення та розвитку інженерної інфраструктури держави.

**Постановка проблеми.** Освітня компонента «Інженерна та комп'ютерна графіка» є ключовою в підготовці інженерних кадрів, оскільки забезпечує формування просторового мислення, навичок моделювання, проєктної візуалізації та цифрових компетентностей, необхідних для розробки інфраструктурних проєктів, відновлення критичних об'єктів та створення технічної документації. Однак сучасні умови, зумовлені введенням воєнного стану та пов'язані з ним соціально-політичні й економічні перетворення в Україні, формують нову освітню реальність, у якій традиційні форми роботи значною мірою втрачають ефективність. Постійні повітряні тривоги, вимушені переміщення, руйнування інфраструктури, відсутність стабільного електропостачання – усе це впливає на здатність здобувачів підтримувати навчальний ритм. Графічні дисципліни вимагають максимальної концентрації та значної кількості практичних завдань, тому навіть короткочасні перерви в навчальному процесі мають відчутний вплив на динаміку засвоєння матеріалу.

Саме тому основною проблемою сучасної інженерної освіти в умовах воєнного стану є забезпечення ефективного засвоєння графічних дисциплін без традиційного доступу до лабораторій.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових публікацій у сфері вищої освіти показує, що проблема формування графічних компетентностей в складних сучасних умовах активно досліджується науковцями, а їхні роботи спрямовані на вдосконалення навчального процесу. Загальні питання методики графічної підготовки здобувачів висвітлено у працях В. К. Сидоренка, Л. Є. Шкіци [1] та інших науковців. Актуальні проблеми методики викладання інженерної та комп'ютерної графіки в умовах дистанційного навчання розглянуто Н. Бондар та Ю. Перинським [2]. Водночас методики вдосконалення викладання графічних дисциплін з використанням комп'ютерних технологій в умовах воєнного стану досліджувалися Ю. В. Доценком, Н. В. Сидоровою та В. В. Думанською [3]. Окремі праці, зокрема навчальний посібник В. Г. Стеблянка [4], присвячені особливостям роботи в системі автоматизованого проєктування AutoCAD.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри наявність досліджень щодо цифровізації освіти, практичні аспекти організації графічної підготовки здобувачів у воєнних умовах залишаються малодослідженими. Не повною мірою розглянуті питання методичних підходів щодо адаптації навчальних курсів для змішаного чи дистанційного формату під час надзвичайних ситуацій. Також бракує системних досліджень щодо психолого-педагогічного супроводу здобувачів, які навчаються у стресових умовах війни.

**Мета дослідження.** У зв'язку з вищевикладеним метою цієї роботи є комплексне науково-методичне обґрунтування особливостей викладання інженерної та комп'ютерної графіки в умовах воєнного стану з урахуванням сучасних освітніх технологій, психолого-педагогічних чинників і практичного досвіду українських та зарубіжних педагогів.

**Виклад основного матеріалу.** Дистанційний та змішаний формати навчального процесу стали основними моделями організації занять у закладах вищої освіти під час воєнного стану. Перехід був вимушеним і часто раптовим, що спричинило потребу швидкого методичного перепроєктування дисциплін інженерної та комп'ютерної графіки.

Викладачам довелося здійснити:

- адаптацію лекційного матеріалу до онлайн-форматів;
- переосмислення підходів до практичних робіт;
- створення цифрових інструкцій, відеопояснень та покрокових алгоритмів;
- забезпечення безперервності контролю знань попри часові та технічні обмеження здобувачів.

Такі трансформації значно змінили дизайн навчального середовища та вимагали від закладів оперативності, гнучкості та технологічної готовності.

Проте дистанційний формат одночасно створює і нові перспективи – зокрема, можливість цифрової демонстрації, 3D-моделювання та інтерактивних симуляцій, що підвищують наочність і скорочують час на пояснення складних тем.

Сучасний освітній процес базується на застосуванні платформ управління навчанням (Moodle, Microsoft Teams, Zoom, Google Meet), які забезпечують доступ до навчальних матеріалів та безперервну комунікацію між учасниками освітнього процесу.

Використання цих освітніх платформ дає можливість викладачам формувати структурований контент, забезпечувати доступ до матеріалів у будь-який час, організовувати перевірку робіт у стандартизованому форматі та надавати зворотний зв'язок через цифрові інструменти комунікації. Особливо ефективними стали короткі відеоінструкції щодо виконання графічних завдань, відеоконференції для розбору складних тем, електронні тести для оперативного контролю знань та онлайн-консультації під час тривоги.

Проте варто пам'ятати, що кожен здобувач, який опановує освітню компоненту «Інженерна та комп'ютерна графіка», повинен вміти користуватися креслярськими інструментами та виконувати креслення вручну, адже без традиційних методів не обійтися. Водночас поєднання класичного та сучасного підходів до створення інженерних креслень

допомагає розвивати просторове мислення й технічну ерудицію, пришвидшує виконання завдань, підвищує якість самостійної роботи та підвищує рівень професійної підготовки майбутніх фахівців [3].

Дослідження показують, що використання комп'ютерного креслення в дистанційному форматі підвищує мотивацію здобувачів і сприяє кращому засвоєнню навчального матеріалу [5].

Одним із найбільш поширених сучасних і визнаних інструментів комп'ютерного креслення є AutoCAD – програмний продукт компанії Autodesk, який широко використовується у промисловості, будівництві, архітектурі та освіті. Застосування AutoCAD у дистанційному навчанні дозволяє забезпечити безперервність освітнього процесу та зберегти високий рівень графічної підготовки здобувачів.

AutoCAD є універсальною системою автоматизованого проектування, що забезпечує створення двовимірних і тривимірних графічних моделей. Програма підтримує роботу з шарами, блоками, параметричними об'єктами та стандартами оформлення креслень, що відповідають міжнародним і національним нормам (ISO, ДСТУ).

З дидактичного погляду AutoCAD виконує функцію навчального середовища, у якому здобувач не лише відтворює готові алгоритми побудови, а й розв'язує практичні завдання, аналізує помилки та самостійно коригує результати своєї роботи.

AutoCAD ефективно поєднується з вищезазначеними навчальними платформами, оскільки дозволяє передавати файли креслень у цифровому форматі та здійснювати поетапний контроль виконання завдань.

Серед основних можливостей AutoCAD у дистанційному навчанні варто виокремити:

- виконання індивідуальних і групових графічних робіт;
- демонстрацію процесу побудови креслень під час онлайн-занять;
- використання навчальних відеоматеріалів та інтерактивних інструкцій;
- організацію самостійної роботи здобувачів з елементами самоконтролю.

Застосування AutoCAD у навчальному процесі дозволяє максимально наблизити навчання до умов майбутньої професійної діяльності. Здобувачі опановують сучасні інструменти проектування, що підвищує їхню конкурентоспроможність на ринку праці.

Аналізуючи можливі інструменти та цифрові середовища для вивчення інженерної та комп'ютерної графіки варто також зосередити увагу і на методичних підходах щодо формування графічних компетентностей у кризових умовах. Так, досвід викладачів і результати педагогічних експериментальних досліджень [2] свідчать про те, що найбільш результативною є так звана «змішана модель» вивчення освітньої компоненти «Інженерна та комп'ютерна графіка». Ця модель передбачає виконання базових завдань за допомогою креслярського приладдя, що сприяє розвитку просторової уяви, з подальшим поступовим введенням CAD-систем. Також для кращої візуалізації складних тем, пропонується впровадження 3D-моделювання, що дає можливість компенсувати обмеження, пов'язані з відсутністю очної взаємодії.

Щоб забезпечити логічну цілісність і результативність реалізації зазначеної «змішаної моделі», доцільно розглянути не лише поєднання традиційних і цифрових інструментів, а й особливості організації педагогічної взаємодії в умовах обмеженого очного спілкування. Саме тому наступним важливим аспектом є налагодження ефективної комунікації між викладачем і здобувачем під час самостійного виконання графічних завдань. Зворотний зв'язок стає ключовим чинником успішності здобувачів, адже відсутність миттєвої корекції значно ускладнює формування графічних навичок.

Як показує практичний досвід, ефективність самостійного виконання графічних завдань значною мірою підвищується завдяки використанню аудіо- та відеокоментарів ви-

кладача, які забезпечують оперативний зворотний зв'язок і уточнення складних моментів. При цьому важливу роль відіграє демонстрація типових помилок, що сприяє їх усвідомленню та запобіганню в подальшій роботі здобувачів.

Доцільним є також застосування «мікроконсультацій», спрямованих на швидке розв'язання конкретних навчальних труднощів. Яскравим прикладом таких «мікроконсультацій» є накладання коментарів поверх креслення. Це реалізується шляхом використання кольорових маркерів, стрілок, умовних позначок або навіть коментарів в PDF, що дає візуальний зворотний зв'язок без тривалих пояснень.

Крім того, перевірка проміжних етапів виконання завдань, а не лише кінцевого результату, дозволяє своєчасно коригувати помилки й підвищувати якість засвоєння матеріалу. Наприклад, надсилання здобувачами 2-3 фотографій процесу виконання завдання (початковий, проміжний та фінальний етап) дає можливість викладачеві прослідкувати їх логіку мислення та легше виявити джерело помилки.

**Висновки.** У ході дослідження встановлено, що умови воєнного стану суттєво трансформували процес викладання інженерної та комп'ютерної графіки, зумовивши необхідність переосмислення традиційних методик і впровадження гнучких освітніх моделей. Дистанційний і змішаний формати навчання, попри наявні технічні та психологічні труднощі, відкрили нові можливості для використання цифрових технологій, зокрема САД-систем, які дозволяють забезпечити безперервність освітнього процесу та підтримувати належний рівень графічної підготовки здобувачів.

Адаптація викладання інженерної та комп'ютерної графіки до умов воєнного стану має ґрунтуватися на поєднанні традиційних і цифрових технологій, використанні «змішаної моделі» вивчення освітньої компоненти та врахуванні психолого-педагогічних особливостей здобувачів освіти. Запропоновані підходи сприяють формуванню стійкої та ефективної системи графічної підготовки майбутніх інженерів, здатних до професійної діяльності в умовах відновлення та розвитку інженерної інфраструктури України.

#### Список використаних джерел

1. Шкіца, Л. Є., Тарас, І. П., & Бекіш, І. О. (2021). Методичні аспекти викладання інженерної та комп'ютерної графіки в дистанційному режимі. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*, 201(1), 45–48. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2021-1-201-45-48>
2. Бондар, Н., & Перинський, Ю. (2023). Актуальні проблеми методики викладання інженерної та комп'ютерної графіки в умовах дистанційного навчання. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка*, 178(22), 8–13. <https://doi.org/10.58407/232202>.
3. Доценко, Ю. В., Сидорова, Н. В., & Думанська, В. В. (2023). Методики вдосконалення викладання графічних дисциплін з використанням комп'ютерних технологій в умовах воєнного стану. *Інноваційна педагогіка: Теорія і методика професійної освіти*, 65(1), 155–158. <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2023/65.1.32>.
4. Стеблянюк, В. Г., & Жданів, І. В. (2008). *Комп'ютерна графіка AutoCAD: Навчальний посібник*. Донецький нац. ун-т економіки та торгівлі.
5. Autodesk. (n.d.). *AutoCAD quick start guide: Tutorials*. <https://www.autodesk.com/learn/ondemand/curated/autocad-quick-start-guide>.

#### References

1. Shkitsa, L., Taras, I., Bekish, I. (2021). Metodichni aspekty vykladannia inzhenernoi ta kompiuternoi hrafiky v dystantsiynomu rezhymi [Methodical aspects of engineering and computer graphics teaching in remote mode]. *Naukovi zapysky. Serii: Pedagogichni nauky – Scientific Notes. Series: Pedagogical Sciences*, 201(1), 45–48. <https://doi.org/10.36550/2415-7988-2021-1-201-45-48>
2. Bondar, N., & Perynskyi, Yu. (2023). Aktualni problemy metodyky vykladannia inzhenernoi ta kompiuternoi hrafiky v umovakh dystantsiinoho navchannia [Current issues in teaching engineering and computer graphics in distance learning]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Chernihivskiy kolehium» imeni T. H. Shevchenka – Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Chernihiv*, 178(22), 8–13. <https://doi.org/10.58407/232202>.

3. Dotsenko, Yu. V., Sydorova, N. V., & Dumanska, V. V. (2023). Metodyky vdoskonalennia vykladannia hrafichnykh dystsyplin z vykorystanniam kompiuternykh tekhnolohii v umovakh voien-noho stanu [Methods for improving the teaching of graphic disciplines using computer technologies in conditions of martial law]. *Innovatsiina pedahohika: Teoriia i metodyka profesiinoi osvity – Innovative pedagogy: Theory and methodology of vocational education*, 65(1), 155–158. <https://doi.org/10.32782/2663-6085/2023/65.1.32>.

4. Steblianko, V. H., & Zhdaniv, I. V. (2008). Kompiuterna hrafika AutoCAD: Navchalnyi posibnyk [Computer graphics AutoCAD: Training manual]. *Donetskyi nats. un-t ekonomiky ta torhivli*.

5. AutoCAD Quick Start Guide. Tutorials. Autodesk – Official website. <https://www.autodesk.com/learn/ondemand/curated/autocad-quick-start-guide>.

Дата першого надходження статті до видання: 08.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.11.2025

UDC 378.147

**Iryna Nahorna**

Senior Lecturer of Welding Technologies and Construction Department  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [irynanahorna@stu.cn.ua](mailto:irynanahorna@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5075-8712>

ResearcherID: [M-4382-2019](https://orcid.org/0000-0002-5075-8712), Scopus Author ID: [57192820279](https://orcid.org/0000-0002-5075-8712)

## FEATURES OF TEACHING ENGINEERING AND COMPUTER GRAPHICS IN MARTIAL LAW

*The presented work is devoted to a comprehensive analysis of the peculiarities of teaching engineering and computer graphics in higher education institutions of Ukraine under martial law. The relevance of the study is determined by significant changes in the organization of the educational process caused by military actions, the transition to distance and blended learning formats, limited access to material and technical resources, as well as increased psycho-emotional stress on students and teachers. This problem is of particular importance for graphic disciplines, which require systematic practice, a high level of concentration, and continuous pedagogical support.*

*The paper analyzes current scientific research on the methodology of teaching engineering and computer graphics, identifies the main difficulties in forming graphic competencies under crisis conditions, and outlines insufficiently studied aspects of organizing the educational process. The necessity of methodological rethinking of educational courses is substantiated, taking into account the instability of the learning environment, technical limitations, and the need to ensure continuity of education.*

*Particular attention has been paid to the use of distance learning platforms and digital tools for organizing lectures and practical classes, assessing learning outcomes, and providing feedback. The didactic potential of the «blended model» study of the educational component, which combines traditional manual drafting with the use of modern CAD systems, is examined. It is shown that this model contributes to the development of spatial thinking, the formation of students' technical culture, and an increase in the effectiveness of independent work.*

*The capabilities of the computer-aided design system AutoCAD as a basic tool for computer drafting in a distance learning format are analyzed separately. It is determined that the use of AutoCAD ensures compliance of drawings with current standards, enables individual and group forms of work, allows step-by-step monitoring of task performance, and brings the learning process closer to real professional practice. Considerable attention has been paid to organizing effective pedagogical interaction, including the use of video and audio consultations, demonstration of typical mistakes, and «micro-consultations», which improve the quality of learning outcomes.*

*It is concluded that the implementation of flexible methodological approaches, the integration of traditional and digital learning technologies, and consideration of psychological and pedagogical factors are key to ensuring sustainable and effective training in engineering and computer graphics under martial law.*

**Keywords:** engineering graphics; computer graphics; martial law; distance learning; blended learning; AutoCAD; CAD systems; graphic competencies.

**References:** 5.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-127-133](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-127-133)

UDC 629.735.02:621.6

**Murad Nusratzade**

Lecturer, Faculty of Air Transport – Aircraft Flight Operation  
National Aviation Academy (Baku, Azerbaijan)

E-mail: [murad.nusratzada@naa.edu.az](mailto:murad.nusratzada@naa.edu.az). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0348-3636>

**UH-60 ENERGY ANALYSIS FOR S<sub>0</sub> AND S<sub>2</sub> CONFIGURATIONS**

*This article presents an energy analysis of the UH-60 Black Hawk helicopter main rotor at a constant speed of 258 RPM for two blade configurations: the base (S<sub>0</sub>) and modified (S<sub>2</sub>) ones. Using calculated data and CFD modeling results, a comparison of the thrust (C<sub>t</sub>), power (C<sub>p</sub>), and integral efficiency (FM) coefficients is performed. It is found that when switching from S<sub>0</sub> to S<sub>2</sub>, the power coefficient decreases by 39.5%, and the efficiency index increases by 60.4%, with virtually unchanged thrust. An analysis of the pressure and velocity distributions confirms a reduction in induced losses and equalization of the flow field behind the rotor. The results demonstrate that geometric optimization of the blade provides a significant increase in energy efficiency without increasing the speed and without losing the lifting capacity, which opens up prospects for further improvement of the rotor systems of medium-class helicopters.*

**Keywords:** UH-60 Black Hawk; energy analysis; thrust coefficient (C<sub>t</sub>); power coefficient (C<sub>p</sub>); rotor efficiency (FM).

Fig.: 4. References: 9.

**Introduction.** The energy efficiency of a helicopter's rotor system determines the specific power consumption for generating thrust and, consequently, operational efficiency, thermal and acoustic loads, and the service life of the powerplant and transmission. Under fixed rotor speed conditions, efficiency gains are achieved by optimizing the blade's aerodynamic characteristics and load distribution across its span. The practical significance of this problem increases for medium-class aircraft operating in a wide range of missions and subject to weight, noise, and reliability constraints.

The objective of this study is to quantitatively analyze the energy performance of a UH-60 Black Hawk main rotor at a constant RPM of 258 using two blade geometry configurations: the base (S<sub>0</sub>) and modified (S<sub>2</sub>). The comparison is based on the energy balance and dimensionless parameters, ensuring accurate comparison of results under constant external conditions.

The problem statement requires the determination and analysis of the thrust  $T$ , torque  $Q$ , and power  $P = Q \omega$  parameters, as well as the calculation of the dimensionless thrust  $C_t$  and power  $C_p$  coefficients, which are reduced to a single integral rotor efficiency indicator  $FM = C_t^{(3/2)} / C_p$ . This set of metrics allows for a simultaneous assessment of the rotor's ability to generate lift, the "price" of this lift in power, and the overall energy optimality of the operating mode.

The object of this study is a four-bladed UH-60 main rotor with fixed geometric and kinematic parameters. The subject of this study is the effect of blade modification (S<sub>0</sub>→S<sub>2</sub> transition) on the energy characteristics while maintaining identical boundary conditions. The methodological basis is a computational and experimental approach using computational aerodynamics results for steady-state conditions, time-averaged integral quantities, and agreed-upon comparison criteria.

The experimental conditions are set as follows: the rotational speed is constant (RPM = 258), the angular velocity  $\omega$  is fixed; the air density corresponds to the standard sea atmosphere ( $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ); the external thermobaric parameters are unchanged; the stepping and control laws are not changed during the comparison; only the geometric configurations of the S<sub>0</sub> and S<sub>2</sub> blades are compared. This procedure excludes confounding factors and allows the observed differences to be attributed to the energy effects of the modification itself.

The study's hypothesis is that switching to the S<sub>2</sub> configuration reduces specific power losses (decreases  $C_p$ ) while maintaining or moderately reducing  $C_t$ , leading to an increase in the integral FM efficiency indicator at the same rotational speed. An additional metric for engineering interpretation is the  $P/T$  ratio, which represents the "cost of thrust" in power.

The objectives of the study include: (1) calculating  $T$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $C_t$ ,  $C_p$ , and  $FM$  for  $S_0$  and  $S_2$  under given conditions; (2) normalizing the results to the baseline configuration of  $S_0$  and determining relative changes; (3) comparing energy metrics, including  $P/T$  and  $Q/T$ , with a conclusion on the feasibility of modification; (4) formulating an engineering interpretation of the causes of the observed differences through load redistribution across the span and associated inductive losses.

The limitations of the study are limited to the analysis of a single rotational speed and a constant external environment, without considering acoustic parameters and non-stationary flow effects. For the purpose of this study, these limitations allow us to focus on the energy consequences of the blade's geometric modification, all other things being equal.

The calculation methodology is based on dimensionless coefficients that allow for the comparison of the aerodynamic efficiency of different rotor configurations under identical external conditions. Three key parameters were determined for the UH-60 main rotor: the thrust coefficient  $C_t$ , the power coefficient  $C_p$ , and the integral efficiency index  $FM$  (Figure of Merit).

The calculation formulas are as follows:

$$C_t = \frac{T}{\rho A (\Omega R)^2}, \quad C_p = \frac{P}{\rho A (\Omega R)^3}, \quad FM = \frac{C_t^{3/2}}{C_p},$$

Where  $T$  – thrust, N;  $P = Q \omega$  – power, W;  $\rho$  – air density, kg/m<sup>3</sup>;  $A = \pi R^2$  – rotor disk area, m<sup>2</sup>;  $\Omega$  – angular velocity of rotation, rad/s;  $R$  – rotor radius, m.

The use of these coefficients ensures comparability of results regardless of the diameter and rotational speed of the propeller [2, pp. 154–156]. The  $FM$  coefficient characterizes the energy efficiency of the system: the higher its value, the lower the proportion of power lost due to inductive and viscous losses [5, pp. 312–316].

The calculation was performed for a four-bladed UH-60 Black Hawk rotor at a constant rotation speed of  $RPM = 258$  ( $\omega = 27.028$  rad/s) and air density  $\rho = 1.225$  kg/m<sup>3</sup> [7, pp. 114–115]. The geometric parameters are rotor diameter  $D = 16.36$  m and disk area  $A = 210.2$  m<sup>2</sup>. The calculated values of the thrust and torque parameters were taken from the results of numerical modeling (SolidWorks Flow Simulation) and averaged over the steady state [9, pp. 122–125].

Two blade configurations were used for the analysis:

- $S_0$ — basic, initial profile shape;
- $S_2$ — modified configuration with redistribution of radial load.

The calculated values of thrust  $T$ , torque  $Q$ , power  $P$ , coefficients  $C_t$ ,  $C_p$  and the  $FM$  index are given in Table 1. All values refer to the same rotation mode and atmospheric conditions, which ensures a correct energy comparison [8, pp. 198–202].

Table 1 – Input and output parameters of UH-60 ( $S_0$ ,  $S_2$ )

| Configuration | T (kN) | Q (kN m) | P (kW) | $C_t$  | $C_p$  | FM           |
|---------------|--------|----------|--------|--------|--------|--------------|
| $S_0$         | 63.4   | 64.3     | 1736.4 | 0.0391 | 0.0152 | <b>0.508</b> |
| $S_2$         | 62.0   | 38.7     | 1045.6 | 0.0382 | 0.0092 | <b>0.815</b> |

Thus, the obtained data serve as the initial basis for subsequent energy comparison of the  $S_0$  and  $S_2$  configurations using the dimensionless criteria  $C_t$ ,  $C_p$  and  $FM$  [3, pp. 247–252].

## 2.2. Energy comparison of the $S_0$ and $S_2$ configurations

A comparison of the baseline and modified rotor configurations was performed using relative changes in the dimensionless parameters  $C_t$ ,  $C_p$ , and  $FM$ . This approach eliminates the influence of absolute thrust and power values, focusing on the change in efficiency when moving from the baseline blade shape ( $S_0$ ) to the optimized one ( $S_2$ ) [1, pp. 215–217].

Relative increments were calculated using the formulas:

$$\Delta C_t = \frac{C_{t2} - C_{t0}}{C_{t0}} \cdot 100\%, \quad \Delta C_p = \frac{C_{p2} - C_{p0}}{C_{p0}} \cdot 100\%, \quad \Delta FM = \frac{FM_2 - FM_0}{FM_0} \cdot 100\%$$

where the indices “0” and “2” correspond to the configurations  $S_0$  and  $S_2$ . The calculation was performed under constant input conditions:  $RPM = 258$ ,  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ,  $\omega = 27.028 \text{ rad/s}$  [7, pp. 119–120].

Substituting the values of the coefficients from Table 1 ( $S_0$ :  $C_t = 0.0391$ ,  $C_p = 0.0152$ ,  $FM = 0.508$ ;  $S_2$ :  $C_t = 0.0382$ ,  $C_p = 0.0092$ ,  $FM = 0.815$ ), we obtain:

$$\Delta C_t = -2.3\%, \quad \Delta C_p = -39.5\%, \quad \Delta FM = +60.4\%.$$

Table 2 – Relative changes in parameters (in %)

| Parameter | The meaning of $S_0$ | The meaning of $S_2$ | Change $\Delta$ (%) |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------------|
| $C_t$     | 0.0391               | 0.0382               | -2.3                |
| $C_p$     | 0.0152               | 0.0092               | -39.5               |
| $FM$      | 0.508                | 0.815                | +60.4               |

According to the obtained data, the transition from the  $S_0$  to  $S_2$  configuration led to a slight decrease in the thrust coefficient ( $-2.3\%$ ) with a sharp decrease in the power coefficient ( $-39.5\%$ ) and an increase in the integral efficiency index  $FM$  by  $60.4\%$ . This result confirms that the redistribution of the radial load and optimization of the blade shape ensure a reduction in energy losses without deteriorating the load-bearing capacity [5, pp. 312–316].

Thus, the  $S_2$  configuration demonstrates a higher level of energy efficiency at the same speed and under the same external conditions. The increase in  $FM$  is a direct consequence of the decrease in  $C_p$ , indicating an improvement in speed distribution and a reduction in inductive losses [8, pp. 200–202].

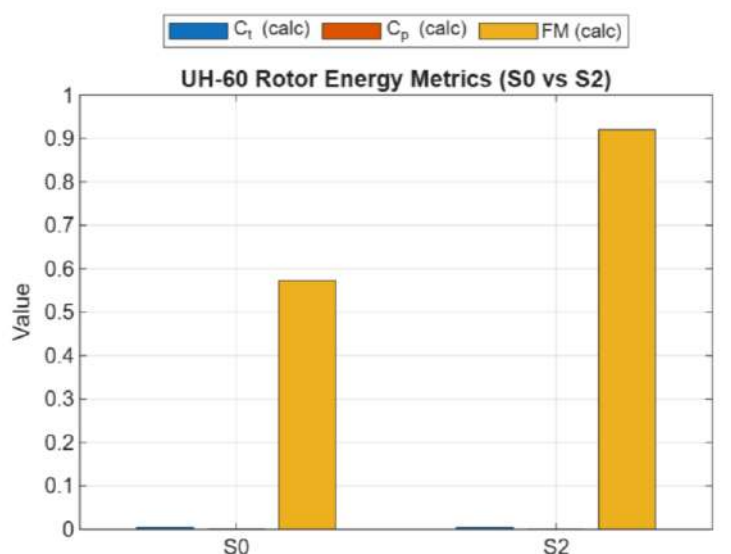


Fig. 1. UH-60 Rotor Energy Metrics ( $S_0$  vs  $S_2$ )

Figure 1 presents a comparative assessment of the calculated thrust coefficient  $C_t$ , power coefficient  $C_p$ , and integral efficiency index  $FM$  for the  $S_0$  and  $S_2$  blade configurations at a constant rotor speed. It can be observed that the transition from the baseline configuration  $S_0$  to the modified configuration  $S_2$  results in only a minor reduction in the thrust coefficient, while the power coefficient decreases substantially. As a direct consequence, the integral efficiency index  $FM$  increases markedly. This confirms that the geometric modification primarily affects the energy consumption of the rotor rather than its lift-generating capability, leading to a significant improvement in overall energy efficiency.



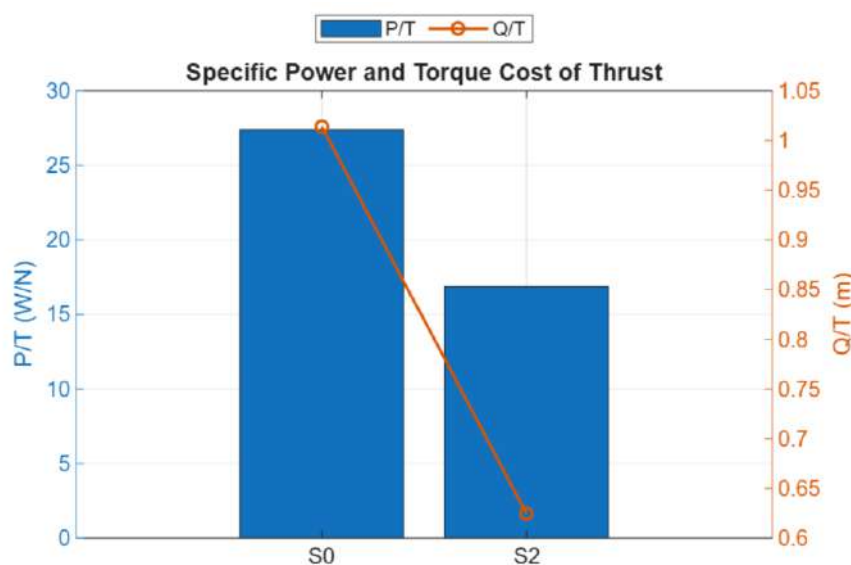


Fig. 2. Specific Power and Torque Cost of Thrust

Figure 2 illustrates the specific power  $P/T$  and torque  $Q/T$  required to generate unit thrust for the  $S_0$  and  $S_2$  configurations. The results indicate that the  $S_2$  configuration achieves a pronounced reduction in both metrics, demonstrating a lower energetic and mechanical cost of thrust generation. The decrease in  $P/T$  reflects reduced power demand for the same lift level, while the reduction in  $Q/T$  indicates lower torque loading on the transmission system. These effects highlight the practical engineering benefits of the modified blade geometry in terms of reduced energy consumption and mechanical stress.

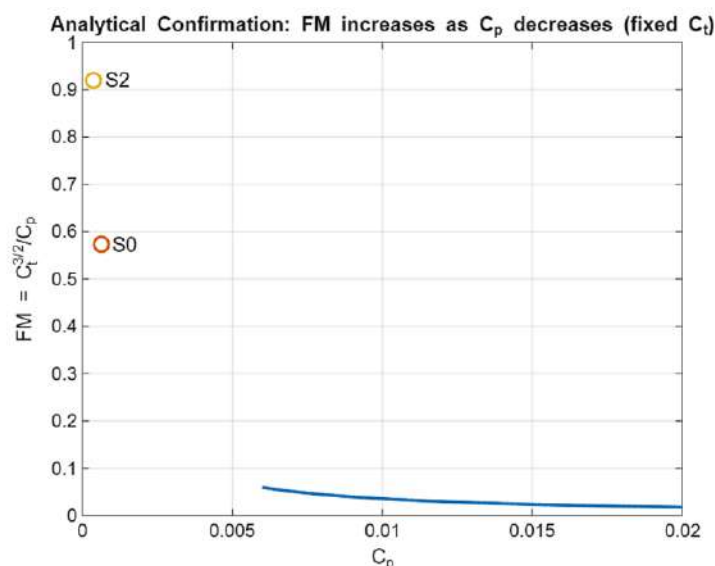


Fig. 3. Analytical Confirmation of FM Growth with Decreasing  $C_p$  (Fixed  $C_t$ )

Figure 3 provides an analytical confirmation of the relationship between the power coefficient  $C_p$  and the integral efficiency index  $FM$  at an approximately constant thrust coefficient. The continuous curve represents the analytical dependence  $FM = C_t^{3/2}/C_p$ , while the discrete points corresponding to the  $S_0$  and  $S_2$  configurations are superimposed. The position of these points on the same analytical curve demonstrates that the increase in  $FM$  observed for the  $S_2$  configuration is a direct mathematical consequence of the reduction in  $C_p$ , rather than an artifact of numerical modeling. This confirms the fundamental energy-based nature of the efficiency improvement.



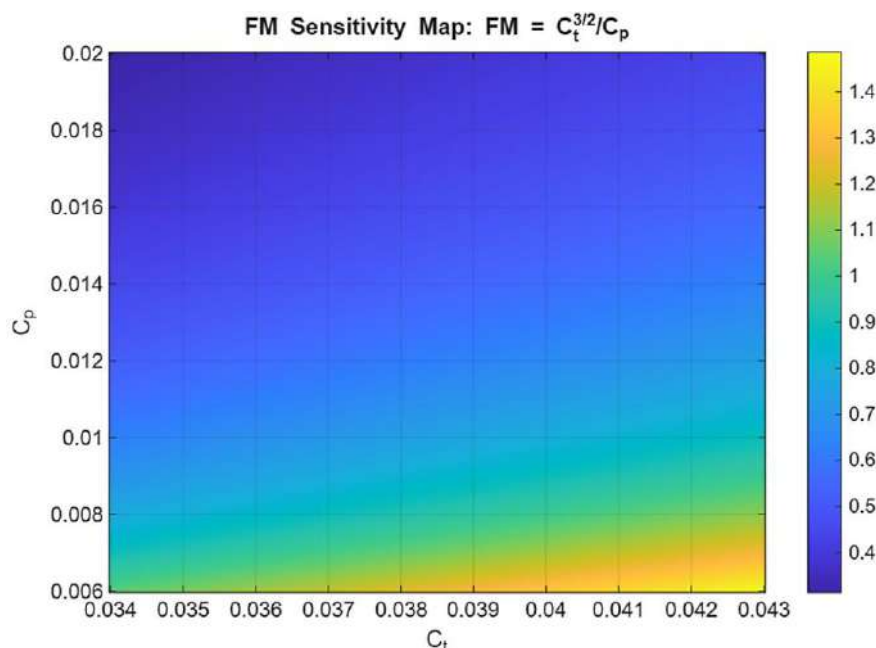


Fig. 4. Sensitivity Map of the Integral Efficiency Index

Figure 4 presents a sensitivity map of the integral efficiency index FM as a function of the thrust coefficient  $C_t$  and the power coefficient  $C_p$ . The map clearly shows that variations in  $C_p$  exert a dominant influence on the efficiency level, whereas moderate changes in  $C_t$  have a comparatively weaker effect. The operating points corresponding to the  $S_0$  and  $S_2$  configurations are located in regions of distinctly different efficiency, with  $S_2$  lying in a zone of significantly higher FM. This result confirms the robustness of the obtained conclusions and demonstrates that the efficiency gain is not limited to a single operating point but reflects a general improvement in the rotor energy balance.

### Energetic interpretation of results

An energetic interpretation of the calculation results and numerical analysis for the  $S_0$  and  $S_2$  configurations allows us to establish a quantitative relationship between the aerodynamic characteristics of the main rotor and its integrated energy efficiency. Primary attention is paid to the change in the dimensionless coefficients  $C_t$ ,  $C_p$ , and the efficiency index FM, as well as their relationship with the specific energy parameters  $P/T$  and  $Q/T$ , which characterize the energy and torque "cost of thrust" [3, pp. 245–247].

### Analysis of changes in $C_t$ , $C_p$ and FM

From the data presented in Tables 1 and 2 it follows that the transition from the basic configuration  $S_0$  ( $C_t=0.0391$ ,  $C_p=0.0152$ ,  $FM=0.508$ ) to the modified configuration  $S_2$  ( $C_t=0.0382$ ,  $C_p=0.0092$ ,  $FM = 0.815$ ) is accompanied by three characteristic tendencies.

First, the thrust coefficient  $C_t$  decreases slightly—by only 2.3%, indicating that the rotor's load-bearing capacity remains unchanged at a constant speed. Second, the power factor  $C_p$  decreases by 39.5%, indicating a significant reduction in power consumption and, consequently, energy losses in the system. Third, the integral efficiency indicator FM increases by 60.4%, confirming a significant improvement in the rotor's energy balance.

This ratio of changes demonstrates that the primary advantage of the  $S_2$  configuration lies not in increased lift, but in the reduced energy costs of generating it. From an energy perspective, this means that the reduction in power losses occurs significantly faster than the reduction in thrust, resulting in an increase in the integral efficiency index. This pattern of changes is typical for rotors with optimized blade geometry, aimed at reducing induced losses and more rationally distributing the load along the radius [5, pp. 312–316].

### Analysis of specific energy indicators P/T and Q/T

To evaluate the energy “cost” of thrust, the P/T and Q/T ratios were calculated, reflecting the power and torque costs per unit of thrust generated [8, pp. 200–202]. Based on the numerical data in Table 1, the following values were obtained:

for configuration S<sub>0</sub>:

P/T=27.38 W/N;

for configuration S<sub>2</sub>:

P/T=16.87 W/N.

Thus, the specific power consumption for generating thrust is reduced by approximately 38%, and the torque load by approximately 39%. These values are in good agreement with the reduction in the power factor Cp and the increase in the FM index, confirming the internal consistency and validity of the applied energy model. The reduction in P/T reflects the savings in the energy potential of the power plant, and the reduction in Q/T indicates a reduction in the loads on the transmission and components of the supporting system [7, pp. 119–120].

### Comparison of energy efficiency of configurations

A comprehensive analysis of the dimensionless and specific energy indicators indicates that the upgraded S<sub>2</sub> configuration offers significantly higher energy efficiency than the original S<sub>0</sub> configuration. With virtually unchanged lift, a significant reduction in required power and torque is observed.

The increase in the integral FM efficiency index from 0.508 to 0.815 reflects the transition of the carrier system to a more rational operating mode, approaching the theoretical efficiency limit determined by the ratio  $Ct3/2/Cp$  [1, pp. 215–217]. Consequently, at a rotation speed of RPM = 258, the S<sub>2</sub> configuration provides an increase in energy efficiency of approximately 60% with a reduction in specific energy costs by 35–40 %.

The obtained results confirm that optimization of blade geometry is one of the most effective ways to increase the overall efficiency of the helicopter’s rotor system without changing the operating parameters [9, pp. 122–125].

**Conclusion.** An energy analysis of the UH-60 Black Hawk helicopter rotor system at a fixed RPM of 258 revealed that switching from the base S<sub>0</sub> blade configuration to the modified S<sub>2</sub> configuration leads to a fundamental improvement in the rotor's energy balance. With virtually unchanged thrust ( $\Delta Ct = -2.3$  %) and significantly lower energy consumption ( $\Delta Cp = -39.5$  %), the integral efficiency index increases from FM = 0.815, corresponding to an increase of 60.4 %.

From an energy perspective, this effect is due to the redistribution of lift across the blade radius and the reduction of induced losses, which leads to a reduction in the power required to generate a given thrust. This is reflected in a significant reduction in the specific P/T and Q/T ratios, which reflect the energy and mechanical load on the power plant and transmission.

Thus, the study results convincingly demonstrate that geometric blade optimization, while maintaining constant operating parameters, can significantly improve the energy efficiency of the rotor system without compromising its lift properties. The findings have practical implications for the further modernization of the UH-60 family of rotors and can be used in the design of advanced rotor systems with an improved balance of thrust, power, and aerodynamic losses.

### References

1. Padfield, G. D. (2007). *Helicopter flight dynamics: The theory and application of flying qualities and simulation modelling*. Blackwell Science.
2. Kroo, I. (2019). *Aircraft design: Synthesis and analysis*. Stanford University.
3. Efimov, V. V. (2018). *Proektirovanie nesushchikh sistem vertolyotov* [Design of helicopter rotor systems]. Mashinostroenie
4. Medvedev, V. A. (2021). *Energeticheskaya effektivnost' vintovykh sistem* [Energy efficiency of rotor systems]. Politek-Press.

5. Stepniewski, W. Z., & Keys, C. N. (1984). *Rotary-wing aerodynamics*. Dover Publications.
6. Johnson, W. (1980). *Helicopter theory*. Princeton University Press.
7. Perov, Yu. V., & Sergeev, V. N. (2012). *Chislennyye metody v aehrodinamike vertolyotov* [Numerical methods in helicopter aerodynamics]. Fizmatlit.
8. Prouty, R. W. (1990). *Helicopter aerodynamics*. McGraw-Hill.
9. Popov, I. M. (2015). *Aehrodinamika vintokrylykh letatel'nykh apparatov* [Aerodynamics of rotorcraft]. MAI-PRINT.

Дата першого надходження статті до видання: 22.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.11.2025

УДК 629.735.02:621.6

**Мурад Нусратзаде**

лектор, факультет повітряного транспорту – Експлуатація польотів повітряних суден

Національна авіаційна академія (Баку, Азербайджан)

E-mail: [murad.nusratzada@naa.edu.az](mailto:murad.nusratzada@naa.edu.az). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0348-3636>

## UH-60 ENERGY ANALYSIS FOR $S_0$ AND $S_2$ CONFIGURATIONS

Метою дослідження є кількісний аналіз енергетичних характеристик несучої системи вертольота UH-60 Black Hawk при постійній частоті обертання ротора (258 об/хв) для двох конфігурацій лопатей — базової ( $S_0$ ) та модернізованої ( $S_2$ ).

У роботі застосовано розрахунковий і числовий підхід, заснований на безрозмірних коефіцієнтах підйомної сили ( $C_l$ ), потужності ( $C_p$ ) та інтегральному показнику енергоефективності ( $FM$ ). Числове моделювання виконано із використанням програмного середовища SolidWorks Flow Simulation за стандартних атмосферних умов ( $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ). Для забезпечення достовірності результатів порівняння проводилось за однакових граничних параметрів без зміни законів керування або кроку лопатей.

Отримані результати показали, що перехід від базової конфігурації  $S_0$  до оптимізованої  $S_2$  зумовлює зменшення коефіцієнта потужності  $C_p$  на 39,5 %, при незначному зниженні коефіцієнта підйомної сили  $C_l$  (–2,3 %). При цьому інтегральний показник ефективності  $FM$  зростає на 60,4 %, що свідчить про суттєве покращення енергетичного балансу системи. Візуальний аналіз тиску та розподілу навантаження по радіусу ротора підтверджує зменшення індукційних втрат і вирівнювання потоку за диском ротора.

Уперше для системи UH-60 на основі CFD-аналізу кількісно доведено зв'язок між геометричною оптимізацією лопаті та зниженням питомих енергетичних втрат. Отримані результати дають можливість розглядати форму  $S_2$  як раціональну для середнього класу вертольотів у режимах сталого обертання.

Модернізована конфігурація  $S_2$  дозволяє зменшити питомі витрати потужності на створення підйомної сили приблизно на 38 %, а також знизити крутний момент на 39 %. Це забезпечує підвищення надійності трансмісійних елементів і довговічності несучої системи.

**Ключові слова:** UH-60 Black Hawk; енергетичний аналіз; коефіцієнт підйому ( $C_l$ ); коефіцієнт потужності ( $C_p$ ); енергоефективність ротора ( $FM$ ).

Рис.: 4. Бібл.: 9.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-134-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-134-141)

UDC 621.8

**Matus Sabol<sup>1</sup>, David Kovaluk<sup>2</sup>, Jan Semjon<sup>3</sup>, Kristian Takac<sup>4</sup>, Oleh Biezhenko<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D student of the Department of Production Systems and Robotics  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>Ph.D student of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>3</sup>Associate Professor, Associate Professor of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk) **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>

**ResearcherID:** AAH-6272-2019. **Scopus Author ID:** 55571411200

<sup>4</sup>Ph.D student of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice, (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [kristian.takac@student.tuke.sk](mailto:kristian.takac@student.tuke.sk)

<sup>5</sup>Engineering student of the Department of production systems and robotics  
Technical University of Košice (Košice, Slovakia)

**E-mail:** [oleh.biezhenko@student.tuke.sk](mailto:oleh.biezhenko@student.tuke.sk)

## VERIFICATION OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF THE ROBOT USING A LASER INTERFEROMETER

*This research focused on the verification of selected geometric characteristics of the Yaskawa SDA 10F industrial robot using a Renishaw XL-80 laser interferometer through an experimental method based on the principles of the STN ISO 9283 standard. The theoretical part of the work includes the analysis of the standard and the selection of measurement methods, while the practical part includes the setup, calibration and data analysis. The expected results will verify the compliance of the robot with the technical specifications and suggest potential optimizations to improve its operational properties. Based on the experiment performed, we can also conclude that the verified parameters of the robot are within the expected values and further use of the robot is possible in the case of lower demands on the resulting positioning repeatability.*

**Keywords:** geometrical characteristics; trajectory; laser Interferometer; STN ISO 9283.

*Fig.: 6. References: 11.*

**Relevance of the research.** Modern development of industrial automation and robotic systems requires increased accuracy and reliability of actuators performing complex technological operations. Industrial robots widely used in various industries must not only be highly dynamic and adaptive, but also exhibit stable kinematic and geometric characteristics, including positioning accuracy and trajectory repeatability. These parameters are critical for assembly processes, precision machining, microelectronic manufacturing and other high-precision technological operations, where even minimal deviations can lead to significant errors and a decrease in product quality.

**Problem statement.** One of the key aspects of the effective functioning of industrial robots is their metrological control, which provides an objective assessment of operational characteristics. The lack of reliable measurement methods leads to the impossibility of guaranteeing the compliance of actual parameters with the declared technical requirements. In this regard, the use of high-precision measuring instruments, such as laser interferometers, becomes particularly important, which allow for a detailed analysis of linear and angular movements of the manipulator, as well as the detection of potential systematic errors in its operation.

**Analysis of recent research and publications.** Metrological standards, such as STN ISO 9283, regulate methods for estimating the accuracy characteristics of industrial robots; define permissible errors and methods for their measurement. This standard provides a unified approach to testing manipulators, which allows for the correct interpretation of the obtained results and their comparison with regulatory requirements [1].

**Uninvestigated parts of a common problem.** In addition to the research objectives, the motivation for performing these measurements also arose from a real technical problem [2]. During previous operations, internal damage to the pneumatic hoses and internal cables running through the hollow structure of the robot's wrist joints (the last two axes) was discovered. This required complete disassembly of the 6th and 7th axes of the Yaskawa SDA-10F robot, replacement of the damaged components, and subsequent reassembly of the system. After reinstallation, deviations were observed when executing previously tested programs, indicating potential changes in the kinematic integrity of the robot. This situation led to the need to verify the geometric performance of the robot [3]. Within the geometric characteristics, which could be compared based on already conducted research in this area, we focused on one-way accuracy and repeatability of positioning. The selection of these characteristics is based on the possibility of comparing the measured data with the data declared by the manufacturer in the robot documentation. At the same time, the measurement task served to evaluate the capabilities of the Renishaw XL-80 laser interferometer for robot diagnostics.

**Research objective.** The main objective of the study is to experimentally evaluate the accuracy and repeatability of the robot using a Renishaw XL-80 laser interferometer, as well as to analyze the obtained data to decide on the conditions and limitations of its further use [4,5]. To achieve the main objective, it was necessary to perform measurements on one arm of a Yaskawa SDA-10F two-arm robot, while the robot body had to remain stationary. This avoided introducing additional inaccuracies into the measurement due to torso rotation or base movement. In the case of verifying the geometric characteristics of a robot equipped with 15 controlled axes, it is difficult to determine which kinematic pair has the greatest inaccuracy. Therefore, it was necessary to modify the ISO 9283 methodology so that these inaccuracies could be identified. For this reason, we focused on the most damaged robotic arm equipped with 7 controlled drives, where we expected the greatest deviations due to collisions of the arm with part of the workplace. The damage to the arm was also identified by a visual inspection of the arm, where clear signs of a collision were found in the form of scratches and dents.

**The statement of basic materials.** There is a relatively large number of measuring devices on the market that can be combined with special software for measuring the performance characteristics of robots. For example, the working characteristics of the Fanuc LR Mate 200IC robot were measured using the Renishaw SL-80 laser interferometer. The accuracy of the Renishaw XL-80 laser interferometer is  $\pm 0.0005$  mm. This type of measurement is based on the movement of a reflector (moving mirror) along a laser beam emitted from a laser light source. This means that the measurement is performed along a line parallel to the laser beam [6].

Based on the analysis of existing methods for measuring geometric characteristics of industrial robots and taking into account the experience with the implementation of their simpler versions in previous studies, it was decided to use a more demanding, but at the same time more accurate method. The Renishaw XL-80 laser interferometer, which is highly accurate and reliable, was chosen as the main measuring tool. In addition, the Renishaw XL-80 laser interferometer was chosen due to its extensive use in scientific and industrial research, as well as its compliance with the STN ISO 9283 standard. This ensures that the results can be properly compared with other research data and that the methodology can be implemented in real-world industrial robot applications.

During the development of the experimental methodology, it was decided to focus on measuring positioning accuracy and positioning repeatability. This decision was based on the capabilities of the available measurement equipment – a Renishaw XL-80 laser interferometer – and associated optical components, which are best suited for high-precision linear displacement measurements rather than full three-dimensional trajectory tracking [7, 8].

Key equipment includes: (Renishaw XL-80 (for high-precision linear displacement measurements)); (Retroreflectors and mounting fixtures (for attaching the retroreflectors to the robot)) and Data acquisition and analysis software (CARTO Capture & Explore from Renishaw).

As a result, measurements were performed separately along the X and Y axes. This approach not only matched the capabilities of the measurement system, but also allowed for a high level of measurement accuracy and minimized potential systematic errors [9].

To assess the impact of the payload on the robot's performance, measurements were performed under three loading conditions: 10%, 50%, and 100% of the robot's nominal payload, corresponding to 1 kg, 5 kg, and 10 kg, respectively. In addition, all measurements were carried out at 50% of the robot's maximum nominal speed to ensure a balance between dynamic effects and measurement reliability. Operating at reduced speed minimizes potential disturbances such as vibration, overspeed, or mechanical lag that could otherwise distort the assessment of the robot's true geometric characteristics. The article presents only the results at a maximum load of 100% and a speed of 50%, which are the most critical and used in the robot's automatic mode.

All measurements were performed using only one of the two robot arms. The other arm and the torso (central body) of the robot remained stationary throughout the entire testing process. This configuration was chosen to isolate the geometric performance of the selected manipulator and to avoid introducing additional uncertainties caused by the torso or the other arm movements. This approach also reflects the need to verify the accuracy of an arm that has undergone partial disassembly and reassembly for maintenance on its last two axes [2]. The interferometer is positioned on the workbench so that its laser beam can accurately track the robot's trajectory. The installation is performed on a solid surface to minimize the effects of external factors such as vibrations. After installation, an initial calibration of the interferometer is required to ensure its accuracy.

To evaluate the positioning accuracy and repeatability of an industrial robot, a set of discrete reference points were selected in the robot workspace. The workspace itself was calculated based on the ISO 9283 standard and represents a cube in which the center of the robot endpoint is most often located when performing a task [1]. For unidirectional positioning accuracy and repeatability, we used the following formulas:

Pose accuracy (AP) - is the difference between the position that we have programmed and the average of the positions that the actuator end member has actually reached. The actuator end member must always approach the programmed position from the same direction. From the measured values, the Pose accuracy (AP) in the X, Y axes is calculated according to the relationships where  $(\bar{x}, \bar{y})$  are the coordinates of the barycenter of the set of points reached after repeating the same position n times:

$$AP_x = (\bar{x} - x_c), \quad (1)$$

$$AP_y = (\bar{y} - y_c), \quad (2)$$

Where  $(x_c, y_c)$  are the programmed values and  $(x_j, y_j)$  are the actual (measured) values. While:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j, \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j, \quad (4)$$

The resulting value of the robot's "Pose accuracy":

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2}. \quad (5)$$

Pose repeatability (RP) - expresses the degree of agreement between the locations of the positions reached after n-repetitions of movement to the same-programmed position in the same

direction. From the measured values, the value of RP is calculated as the radius of a sphere whose center is the barycenter according to the relations:

$$RP = \bar{l} + 3S_l, \quad (6)$$

Where ( $S_l$ ) is the standard deviation, ( $l_j$ ) are the actual (measured) values when determining the RP and ( $\bar{l}$ ) are the coordinates of the barycenter of the set of points reached after repeating the same position  $n$  times determining the RP:

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j, \quad (8)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2}. \quad (9)$$

The coordinates of the barycenter of the points reached during  $n$ -repetitions of the same position are calculated according to the relations (3-4).

The points were defined in Cartesian coordinates and were programmed into the robot control system to serve as target positions for measurement.

The positions were chosen to lie along the X and Y axes of the work plane, which corresponds to the direction of propagation of the laser beam in the measurement setup. This allowed for simplified alignment of the Renishaw XL-80 laser interferometer system and maximized the measurement accuracy along each linear axis [10]. The decision to measure each axis separately rather than simultaneously was due to the technical limitations of the optical system and the desire to minimize measurement uncertainty.

An experimental workspace was created to solve our problem, Fig. 1 for measuring selected characteristics of the YASKAWA SDA 10F robot, whose positioning repeatability defined by the robot manufacturer is  $\pm 0.1$  mm [11].



*Fig. 1. Experimental workspace for measuring selected geometrical characteristics.*

The conditions for installing the necessary optics were created near the robot. The Renishaw XL-80 laser interferometer was mounted on an original Renishaw tripod. The reflective optics were mounted on the robot's end, Fig. 2.

560 measurements were performed in accordance with the proposed method and under the same environmental conditions: air temperature 23.7 [°C], air pressure 994.2 [mbar] and humidity 53 [% relative humidity].





*Fig. 2. Reflector mounted on the endpoint of the robot.*

Fig. 3 shows a part of the table where there is a sample of the measured data obtained when measuring on the X-axis at 100% of the payload, i.e. at 10 kg. The results at 10% and 50% speed are not given, since the measured deviations were minimal.

In the table you can see the programmed points (targets), i.e. 0, 50, 100, 150 and 200 mm, the cycle number (Run #), the actual position (Position) in the positive direction (+) and the negative direction (-), as well as the deviations between the specified programmed position and the actually reached position (Error) also in the positive (+) and negative (-) directions.

| X-AXIS 10kg        |             |             |             |             |             |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Index              | 1           | 2           | 3           | 4           | 5           |
| Targets (mm)       | 0           | 50          | 100         | 150         | 200         |
| Run 1 (+) Position | 0           | 50.01509781 | 100.1934111 | 150.1828171 | 200.3105121 |
| Run 1 (+) Error    | 0           | 0.015097809 | 0.193411062 | 0.18281714  | 0.310512125 |
| Run 1 (-) Position | 0.003320022 | 50.07110287 | 100.2188068 | 150.2940132 | 200.3044889 |
| Run 1 (-) Error    | 0.003320022 | 0.07110287  | 0.218806769 | 0.294013198 | 0.304488885 |

*Fig. 3. Data obtained when measured in the X-axis at 100% of the payload, i.e. at 10 kg.*

Fig. 4 shows a part of the table where there is a sample of the measured data obtained when measuring on the Y-axis at 100% of the payload, i.e. at 10 kg.

| Y-AXIS 10kg        |             |             |              |              |              |
|--------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Index              | 1           | 2           | 3            | 4            | 5            |
| Targets (mm)       | 0           | 50          | 100          | 150          | 200          |
| Run 1 (+) Position | 0           | 50.0842829  | 100.0494497  | 150.2069388  | 199.955316   |
| Run 1 (+) Error    | 0           | 0.084282896 | 0.049449725  | 0.20693877   | -0.044683956 |
| Run 1 (-) Position | 0.024071875 | 50.09918669 | 99.94697458  | 149.9616797  | 199.9578225  |
| Run 1 (-) Error    | 0.024071875 | 0.099186686 | -0.053025421 | -0.038320272 | -0.042177506 |

*Fig. 4. Data obtained when measured in the Y-axis at 100% of the payload, i.e. at 10 kg.*

All the data obtained were used to plot graphs for a clearer visual perception and understanding of the variations in accuracy and repeatability at each individual position (Figs. 5 and 6). Each of the colored lines shown in the graphs represents one run in the positive or negative direction with the control positions.



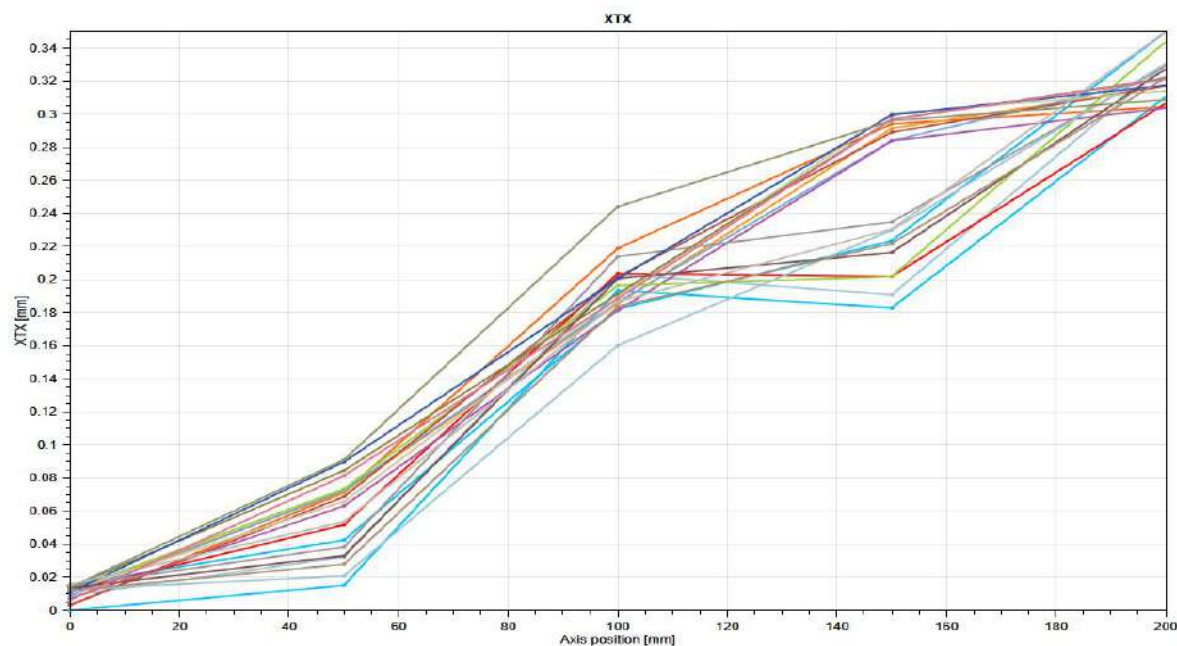


Fig. 5. Graphs of X-Axis measurements with 10 kg payload.

The minimum deviation between the programmed position and the actually reached position was observed at Run 5 (-) and amounted to 0.003080453 mm at 0 mm Position. The maximum deviation between the programmed position and the actually reached position was observed at Run 10 (+) and amounted to 0.349946864 mm at 200 mm Position. The final value of the positioning accuracy of X-Axis APX-100 at 100% payload and 50% speed is 0.349946864 mm. The final value of the positioning repeatability of X-Axis RPX-100 at 100% payload and 50% speed is 0.117493859 mm.

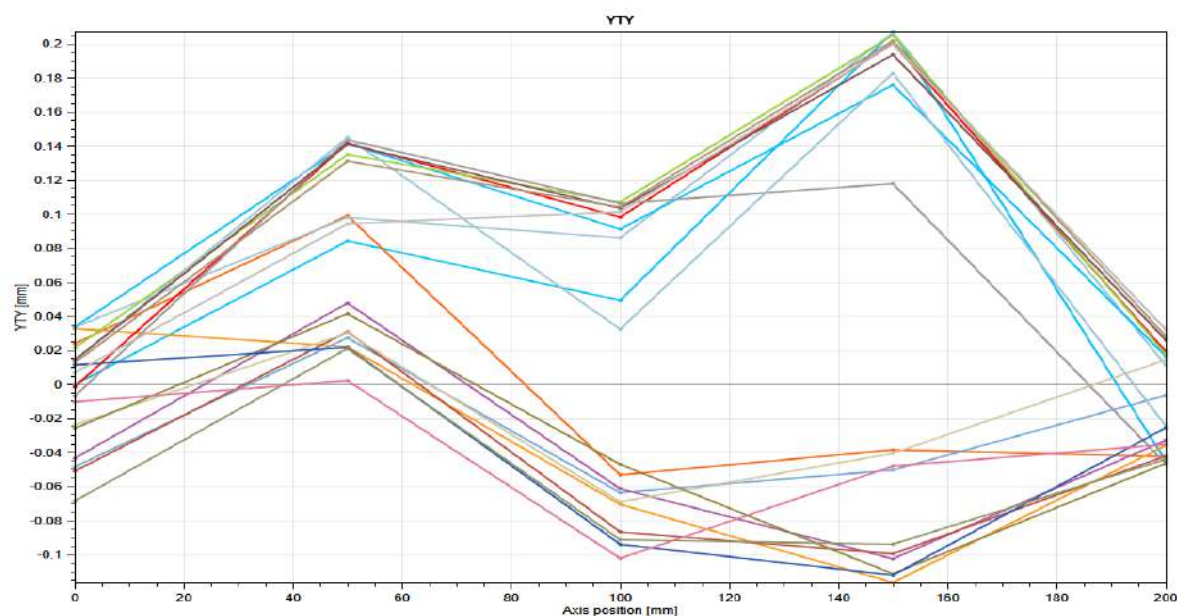


Fig. 6. Graphs of Y-Axis measurements with 10 kg payload.

The minimum deviation between the programmed position and the actually reached position was observed at Run 1 (+) and amounted to 0.206938770 mm at 150 mm Position. The maximum deviation between the programmed position and the actually reached position was observed at Run 4 (+) and amounted to -0.001266144 mm at 0 mm Position. The final value of

the positioning accuracy of Y-Axis APY-100 at 100% payload and 50% speed is 0.323240680 mm. The final value of the positioning repeatability of Y-Axis RPY-100 at 100% payload and 50% speed is 0.323240680 mm.

Based on the calculation performed according to relations (1 to 9), the following resulting values of RP at a speed of 50% (0.272 mm) and RP at a speed of 100% (0.366 mm) were calculated.

**Conclusions.** The main objective of this thesis was to experimentally verify selected geometric characteristics of the YASKAWA SDA-10F industrial robot, specifically its positioning accuracy and repeatability, using a Renishaw XL-80 laser interferometer. All measurements were performed in the X and Y directions of the robot workspace at 100% payload at a constant speed of 50% of the nominal speed. The observed deviation on the Y-axis may be due to increased structural bending at higher loads, thermal effects or minor errors in the optical path. Although these results confirm compliance with the specifications along the X-axis, the data on the Y axis highlight the need for constant monitoring or possible mechanical tuning. The manufacturer's defined value for the repeatable positioning accuracy of the new robot is  $\pm 0.1$  mm. The values recorded during the tests (0.272 mm to 0.366 mm) are, however, in line with expectations for a robot of this category and application class, after several years of operation. Based on the experimental verification carried out, it can be stated that even a robot manufactured in 2012, exposed to various collisions, is able to perform the required tasks, assuming lower demands on the resulting positioning repeatability.

### Acknowledgements

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

### References

1. ISO 9283: 1998, *Manipulating industrial robots — Performance criteria and related test methods*.
2. Semjon, J., et al.: (2020). *Verification of the UR5 robot's properties after a crash caused by a fall of a transferred load from a crane*, In: *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 17, No. 1, s. 1-9.
3. Semjon, et al.: (2018). *Comparison of the delta robot ABB IRB 360 properties after collisions*. 2018. In: *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*.
4. Slamani M, Joubair A, and Bonev IA. *A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques*. *Ind Robot* 2015; 42(6): 572–585.
5. Slamani M and Bonev IA. *Characterization and experimental evaluation of gear transmission errors in an industrial robot*. *Ind Robot* 2013; 40(5): 441–449.
6. Kumičáková, D., Tlach, V., Cisar, M. (2016). *Testing the Performance Characteristics of Manipulating Industrial Robots*. *Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series*.
7. C. Wang, G.Liotto. (2002). *A laser non-contact measurement of static positioning and dynamic contouring accuracy of a CNC machine tool*, *Proceedings of the Measurement Science Conference, Los Angeles, January 24-25, 2002*.
8. Liu, Y.; Li, Y.; Zhuang, Z.; Song, T. (2020). *Improvement of Robot Accuracy with an Optical Tracking System*, *Sensors* 2020, 20(21), 6341.
9. Chapman, M.A.V. (2003). *Limitations of laser diagonal measurements*, *Precision Engineering* 27 (2003), pp. 401-406.
10. Wang, C. (200). *Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors, Part 1: Basic theory*, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No 10.
11. Motoman. <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/assembly-handling/sda-series/sda10f>.

Дата першого надходження статті до видання: 18.09.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

**Матус Сабол<sup>1</sup>, Давид Ковалук<sup>2</sup>, Джон Семен<sup>3</sup>, Крістіан Такач<sup>4</sup>, Олег Бєженко<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [david.kovaluk@student.tuke.sk](mailto:david.kovaluk@student.tuke.sk)

<sup>2</sup>аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [matus.sabol@student.tuke.sk](mailto:matus.sabol@student.tuke.sk)

<sup>3</sup>доцент, доцент кафедри виробничих систем та робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [jan.semjon@tuke.sk](mailto:jan.semjon@tuke.sk), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9076-7808>  
**ResearcherID:** [AAH-6272-2019](https://orcid.org/0000-0002-9076-7808), **Scopus Author ID:** [55571411200](https://orcid.org/0000-0002-9076-7808)

<sup>4</sup>аспірант кафедри виробничих систем та робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина)  
**E-mail:** [kristian.takac@student.tuke.sk](mailto:kristian.takac@student.tuke.sk)

<sup>5</sup>Студент-інженер кафедри виробничих систем та робототехніки  
Кошицький технічний університет (Кошице, Словаччина) **E-mail:** [oleh.biezhenko@student.tuke.sk](mailto:oleh.biezhenko@student.tuke.sk)

## ПЕРЕВІРКА ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТА ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАЗЕРНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

Це дослідження було зосереджено на перевірці вибраних геометричних характеристик промислового робота Yaskawa SDA 10F з використанням лазерного інтерферометра Renishaw XL-80 за допомогою експериментального методу, заснованого на принципах стандарту STN ISO 9283. Метою дослідження є оцінка ключових параметрів продуктивності, а саме точності та повторюваності робота, які є вирішальними для високоточних операцій. Теоретична частина роботи включає аналіз стандарту та вибір методів вимірювання, тоді як практична частина включає налаштування, калібрування та аналіз даних. Очікувані результати підтвердять відповідність робота технічним характеристикам та запропонують потенційні оптимізації для покращення його експлуатаційних властивостей. Експериментальна перевірка проводилася за двома взаємно перпендикулярними осями (X, Y). Загалом було проведено 560 вимірювань при трьох розмірах навантаження та середній швидкості. У статті представлені часткові результати в числовій та графічній формі для максимального навантаження та за осями X та Y. Розраховані дані RP (0,272 мм при 50 % швидкості та 0,366 мм при 100 % швидкості) підтверджують припущення, що ґрунтувалися на спостереженнях, зроблених під час роботи робота. Повторюваність по осях X та Y вища за заявлене виробником значення  $\pm 0,1$  мм. Перевірку проводили на маніпуляторі робота R2, який був більше навантажений під час роботи, оскільки максимальна вага, яку він обробляв, досягала 9,83 кг. Маніпулятор R1 був навантажений максимальною вагою 5,4 кг. Під час перевірки робот, оснащений загалом 15 керованими осями, використовував лише 7 приводів на маніпуляторі R2, а привід на маніпуляторі R1 та обертання корпусу робота, привод B1, не були задіяні в русі. На основі проведеного експерименту також було виявлено, що необхідно придбати додаткові аксесуари для лазерного інтерферометра, що спростило б та пришвидшило б процес перевірки. На основі проведеного експерименту також можна зробити висновок, що перевірені параметри робота знаходяться в межах очікуваних значень, і подальше використання робота можливе у разі зниження вимог до результатуючої повторюваності позиціонування.

**Ключові слова:** геометричні характеристики; траєкторії; лазерний інтерферометр; STN ISO 9283.

**Рис.:** 6. **Бібл.:** 11.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-142-155](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-142-155)

УДК 678.027.32

**Ігор Олександрович Петренко<sup>1</sup>, Тімур Рашитович Ганєєв<sup>2</sup>,  
Максим Геннадійович Болотов<sup>3</sup>, Микита Максимович Стеценко<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>асистент, викладач кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [igor.petrenko0511@stu.cn.ua](mailto:igor.petrenko0511@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8550-8318>, ResearcherID: IQV-2134-2023<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [t.ganeev@stu.cn.ua](mailto:t.ganeev@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2041-1685><sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [m.bolotov@stu.cn.ua](mailto:m.bolotov@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0915-4132>, ResearcherID: H-4183-2014<sup>4</sup>бакалавр, студент групи МБА-251 кафедри технологій зварювання та будівництва

Національний університет “Чернігівська політехніка” (Чернігів, Україна)

E-mail: [malishkalia8@gmail.com](mailto:malishkalia8@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0863-4038>

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ЯКІСНИХ ЗМІН ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛІКОЛІ З ВКЛЮЧЕННЯМИ ПЕРЕРОБЛЕНОГО ПОЛІЕТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТГЛІКОЛЮ

У статті наведено результати дослідження впливу первинного PET-G та вторинного rPET-G на структуру й якість екструзійних полімерних зразків. У шести експериментах (5-30 % rPET-G) встановлено, що прозорість, однорідність і кількість дефектів проявляються не лише в процентному складі, а й температурою та стабільністю процесу екструзії. Оптимізація режимів дозволяє зменшити помутніння та повітряні включення. Отримані дані підтверджують можливість використання значної частки вторинного PET-G без помітної втрати якості, що підтримує принципи замкнутого циклу перероблення.

**Ключові слова:** екструзія; полімерні матеріали; PET-G; rPET-G; варіативність.

Рис.: 14. Табл.: 6. Бібл.: 10.

**Актуальність дослідження.** Проблема повторного використання полімерів набуває особливого значення в умовах зростання споживання пластикової продукції та необхідності зменшення обсягів відходів. PET-G є одним із найпоширеніших матеріалів у пакуванні та 3D-друку, тому дослідження можливостей залучення вторинного rPET-G без суттєвого погіршення якості є практично важливим.

У військових та польових умовах, де утворюються значні обсяги ПЕТ-відходів, організація їхнього збору та перероблення сприяє зниженню екологічного навантаження й забезпечує доступну вторинну сировину. Це підвищує автономність та економічність виробничих процесів.

Оскільки властивості rPET-G залежать від умов підготовки та параметрів екструзії, дослідження структурно-якісних змін матеріалу при різних співвідношеннях компонентів є необхідним для оптимізації технології. Отримані результати сприяють розширенню застосування вторинного PET-G та підтримують концепцію замкнутого циклу перероблення полімерів.

**Постановка проблеми.** Метою цієї роботи є дослідження властивостей пластику, для використання у циклічному процесі виробництва, який виготовляється методом екструдювання, шляхом змішування чистого PET-G з додаванням вторинного матеріалу типу PET-G у відсоткових пропорціях. Через проблематику зв'язку між чистим та вторинним PET-G.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Спираючись на прочитані матеріали та проведені дослідження вказані в списку використаних джерел [1-10], було прийняти рішення спробувати провести перший схожий експеримент в Україні, з використанням мінімально доступним обладнанням та дослідити властивості виробу в

умовах навчального дослідницької роботи. У статтях описувались громісткі процеси виконання з домішками та додатковими діями.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що ретельна підготовка сировини для дослідів та додаткові процеси, добавки стабілізують зразки. У них не були наведені результати чистих дослідів без домішок та стабілізації зразка для подальшого вивчення.

**Метою статті** є експериментальне дослідження та узагальнення результатів щодо впливу первинного PET-G та вторинного rPET-G на структурні та якісні характеристики зразків, обґрунтування можливостей ефективного використання вторинної сировини. Стаття спрямована на демонстрацію потенціалу rPET-G у формуванні замкнутого циклу перероблення та оптимізації технологічних параметрів екструзії для забезпечення стабільних властивостей матеріалу.

**Виклад основного матеріалу.** У рамках забезпечення екологічної безпеки в зоні дислокації військових формувань було впроваджено організований процес збору, транспортування та первинного сортування тари з поліетилентерефталату (ПЕТ, поліетилентерефталат), яка утворюється в результаті споживання бутильованої води особовим складом. Збір пляшок здійснювався силами особового складу підрозділів у спеціально відведені контейнери для вторинної сировини, після чого тара централізовано передавалася до сортувального пункту, де реалізовувався комплекс операцій із підготовки полімерної тари до подальшої утилізації та перероблення.

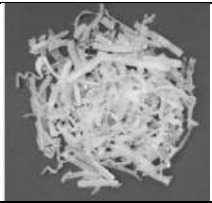
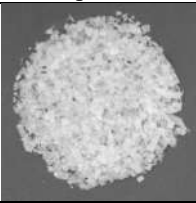
На першому етапі у сортувальному пункті здійснювалося приймання вторинної полімерної сировини з одночасним проведенням інспекції на наявність механічних домішок, залишків рідин, сторонніх матеріалів та забруднень. Після цього проводилось очищення тари шляхом промивання та механічного видалення етикеток і кришок. Оброблена тара надходила до сортувального модуля, де відбувалася класифікація за кольором, ступенем забруднення, а також за типом полімеру, з метою виокремлення саме ПЕТ-фракції, найбільш придатної до вторинного перероблення.

Після сортування пляшки підлягали підготовці до подальших стадій механічного перероблення: пресування у тюки або подрібнення до флексу (флекс – гранульована або пластівцеподібна форма підготовленої ПЕТ-сировини), придатного до повторного використання в ланцюгу виробництва полімерної продукції. У результаті реалізації цього підходу забезпечується зниження обсягів полімерних відходів у польових умовах, створення передумов для замкнутого циклу використання полімерів, а також інтеграція елементів системи управління відходами у військову логістику.

В дослідженні використовувалось змішування первинного чистого PET-G та вторинного PET-G, який отримували шляхом подрібнення, у співвідношенні 95/5 %, 90/10 %, 85/15 %, 80/20 %, 75/25 %, 70/30 %. Об'єктом дослідження є пластинчасті зразки, їхні характеристики взяті за основу дослідження.

Після збору та промивання тари, відкручування кришок та зняття захисного кільця, пластикові пляшки подрібнюють на “пластівці” (рис. 2). Фракція пластику показана в табл. 1, результати подрібнення показані на рис. 1.

Таблиця 1 – Фракція пластику

| Ім'я         | Великий                                                                           | Середній                                                                          | Мілий                                                                               |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Візуально    |  |  |  |
| Розмір       | 0 – 30 мм                                                                         | 0 – 10 мм                                                                         | 0 – 7 мм                                                                            |
| Використання | Листовий прес                                                                     | Листовий прес, Ін'єкційний, Компресія                                             | Листовий прес, Ін'єкційний Компресія, Екструзія                                     |

Джерело: розроблено авторами.



Рис. 1. Результати механічного подрібнення пластикових пляшок



Рис. 2. Процес висушування подрібненого вторинного PET-G

Для дослідження та оцінювання характеристик зразків використано мілку фракцію полімерного матеріалу.

Співвідношення у грамах були підібрані наступним чином: 9,5/0,5 г, 9,0/1,0 г, 8,5/1,5 г, 8,0/2,0 г, 7,5/2,5 г, 7,0/3,0 г.

Під час початкової стадії екструзії у зразках 1 та 2 було зафіксовано незначне помутніння, зразок 3 зміна кольору, при незначному перегріві матеріалу та затримці в зоні плавлення PET-G може частково карамелізуватися, що призводить до появи жовтувато-коричневого відтінку. Зразки 4 та 5 більш прозорі з незначним помутнінням у центрі. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 4. Види отриманих зразків наведені на рис. 3. На рис. 5 зображений графік коефіцієнтів якості кожного зразку першого дослід. Арегування результатів наведені в таблиці 2.

Під час екструзії полімерної нитки спостерігалось утворення повітряних бульбашок, проте завдяки оптимальним параметрам плавлення та пресування більшість із них була елімінована, що забезпечило формування більш однорідної та стабільної структури матеріалу [2].



Таблиця 2 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень першого досліду

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

Після проведення кореляції використаємо формулу коефіцієнта якості для показника прозорості та використовуємо її для подальших показників (1).

$$X_{\text{норм}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}; \quad (1)$$



1



2



3



4



5

Рис. 3. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 95/5

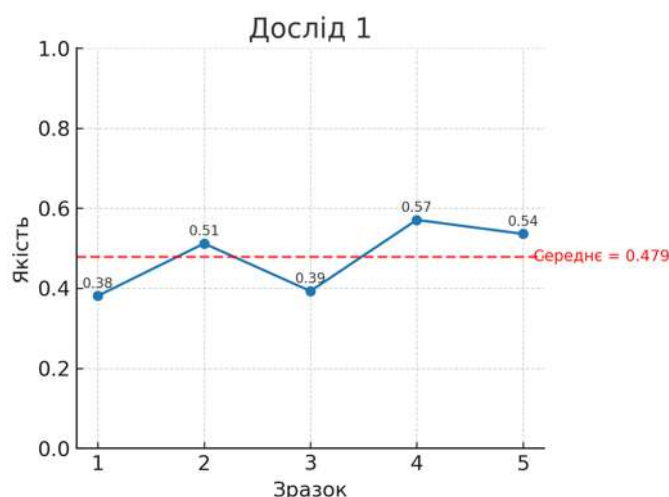


*Рис. 4. Графік показників коефіцієнтів якості першого досліді*

На початкових етапах екструзії було зафіксовано значне помутніння всього зразку 1, це не допустиме, тому не будемо враховувати його характеристики.

Зразок 2 та 3 – карамелізувалися, через залишки попереднього плавлення та екструдвання, пластик перегрівся та залишався якийсь час в точці підвищеної температури. У зразках 4 та 5 в центрі наявне помутніння, але зразки прозорі по краю, їхня структура більш-менш однорідна. Додатково встановлено, що після процесу екструзії у зразках на основі чистого та вторинного PET-G наявні дефекти у вигляді повітряних включень, аналогічні до попередніх спостережень. Арегування результатів показані в таблиці 3. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 5. На рис. 6 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку другого досліді [3].

*Таблиця 3 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень другого досліді*

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | -                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.



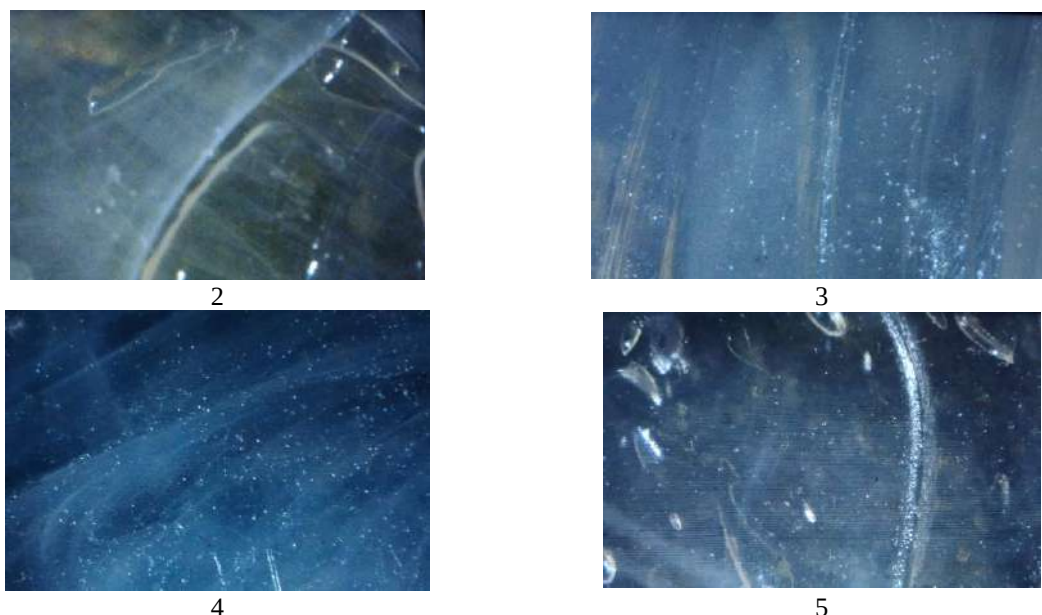


Рис. 5. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 90/10

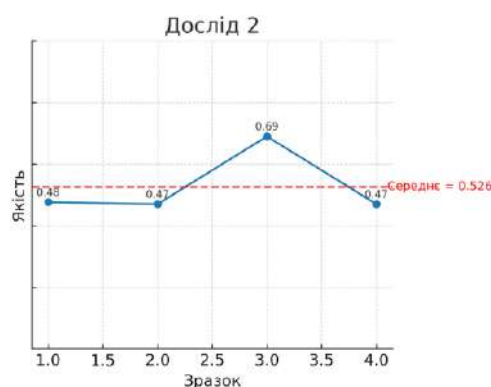


Рис. 6. Графік показників коефіцієнтів якості другого досліду

У процесі екструзії було зафіксовано посилення помутніння зразків 1, 2 та 3, що, ймовірно, пов'язане з впливом швидкого охолодження, яке сприяє утворенню внутрішніх напружень і структурних неоднорідностей. Зразок 1 повністю з помутнінням це не допустимо. У зразках 2 та 3 помутніння лише поверхове. 4 та 5 зразки з незначними помутніннями в центрі, але по краю зразків залишились прозорі частини. Додатково встановлено, що після екструзії у зразках на основі чистого та вторинного PET-G присутні дефекти у вигляді повітряних включень, які негативно впливають на однорідність структури. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис 7. Арегування результатів показано в табл. 4. На рис. 8 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку третього досліді [4].

Таблиця 4 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень третього досліді

| № зразка | Оцінка прозорості |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                   |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                   | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                   |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                   |   |   |   |   |   |   | + |   |    |

Закінчення табл. 4

| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   | + |   |   | + |   |   |    |

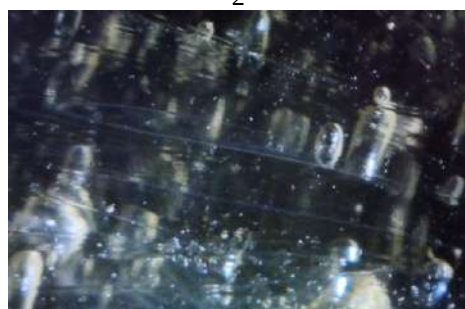
Джерело: розроблено авторами



2



3



4



5

Рис. 7. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 85/15

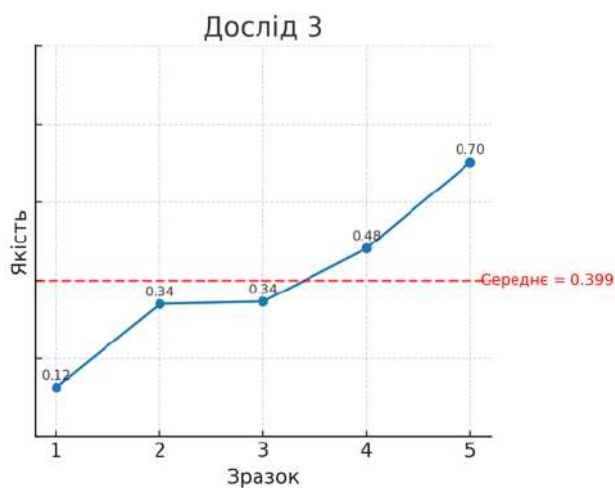


Рис. 8. Графік показників коефіцієнтів якості третього дослід

У процесі екструзії перший тестовий зразок продемонстрував майже повну втрату прозорості внаслідок інтенсивного помутніння, що унеможливило його подальше використання в аналізі. У зв'язку з цим до серії було додано ще один зразок, і загальна кількість дослідних зразків склала шість. Подальші екструзії виявили тенденцію до зменшення інтенсивності помутніння: на початкових стадіях дефекти локалізувалися переважно у центральній частині, це видно на зразках з 1 по 4, однак зі збільшенням температури їх прояв поступово знижувався. При виготовленні зразка 5, спостерігалось лише незначне помутніння на бічній поверхні. Крім того, у процесі підвищення температури було зафіксовано істотне зменшення кількості повітряних включень, що свідчить про позитивний вплив оптимізації параметрів екструзії на якість матеріалу. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 9. Арегування результатів показані в таблиці 5. На рис. 10 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку четвертого досліді [5].

Таблиця 5 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень четвертого досліді

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

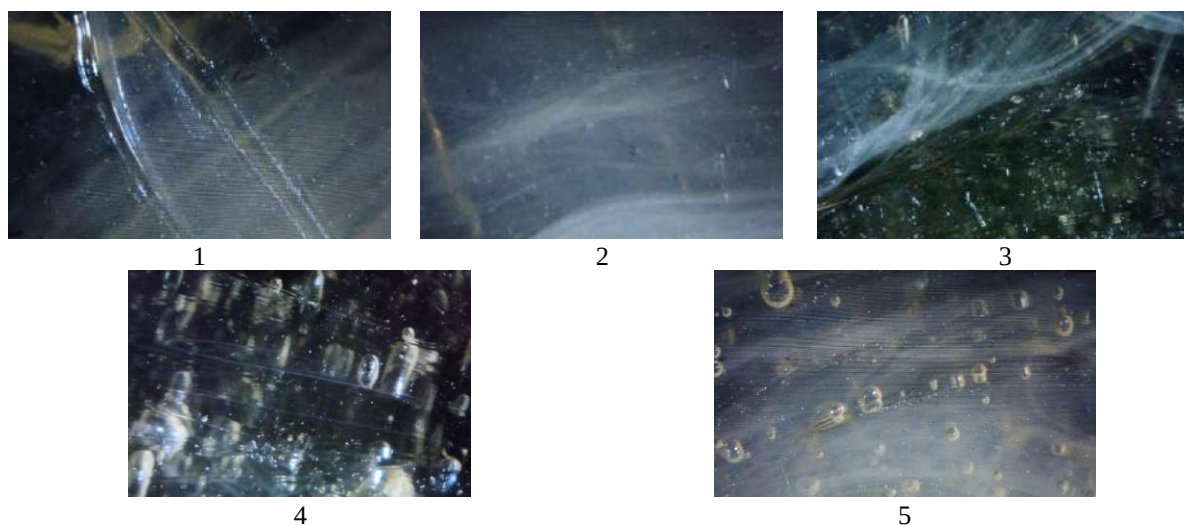


Рис. 9. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 80/20

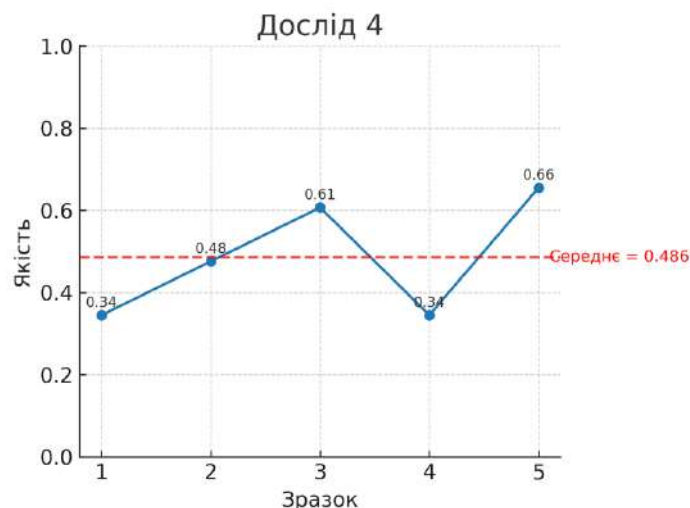


Рис. 10. Графік показників коефіцієнтів якості четвертого дослід

Зразок 1 характеризувався значним помутнінням, при цьому бокові ділянки залишалися відносно прозорими. У подальших експериментах спостерігалось зменшення інтенсивності помутніння: це видно на зразку 2, зразок 3 здобув карамельний відтінок, у зразків 4 та 5 дефект проявлявся лише у центральній частині. Важливим результатом є практично повне усунення повітряних включень, що свідчить про оптимізацію технологічних параметрів процесу. Однорідність зразка 4 майже ідеальна. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 11. Арегування результатів показані в таблиці 6. На рис. 12 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку п'ятого дослід [6].

Таблиця 6 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень п'ятого дослід

| № зразка | Оцінка прозорості                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   |   |   | + |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   | + |   |   |   |   |   |   |    |

Джерело: розроблено авторами.

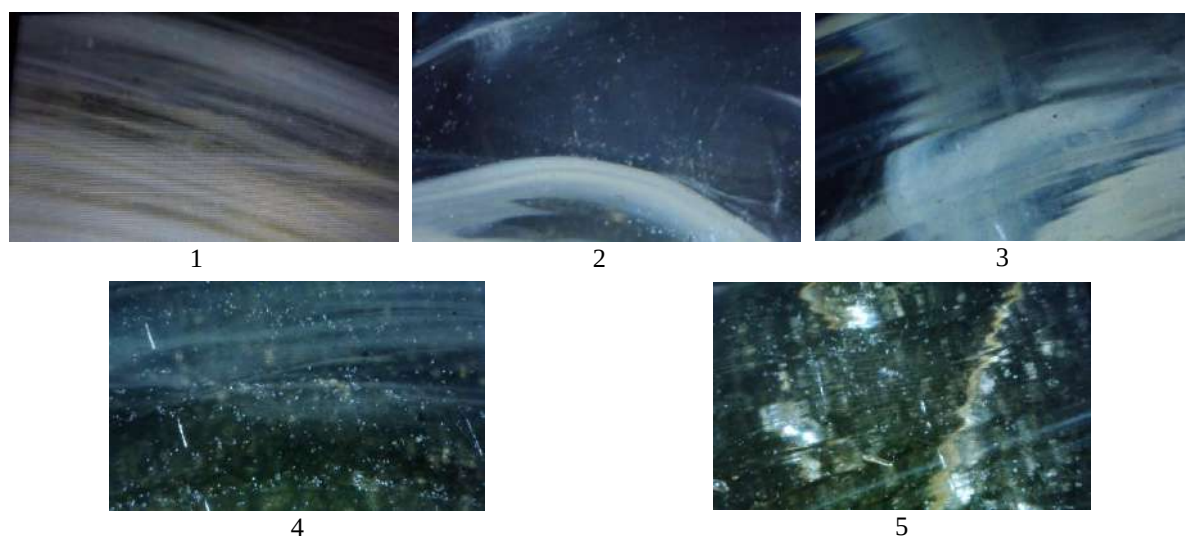


Рис. 11. Зразки під мікроскопом зі співвідношенням 75/25

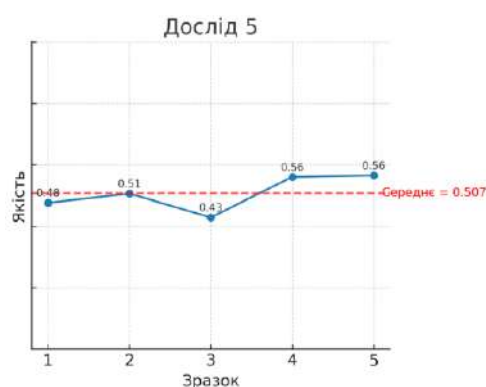


Рис. 12. Графік показників коефіцієнтів якості п'ятого дослід

Під час проведення екструзії зразків спостерігались різні ступені прозорості матеріалу. У частині зразків, а саме 1, 2, 3, відзначались виражені помутніння, що, ймовірно, пов'язано з локальними змінами щільності полімерної матриці, утворенням мікропор та швидкого охолодження. Водночас у зразку 4 помутніння були мінімальними, у зразку 5 повністю відсутні помутніння, що свідчить про рівномірне формування матеріалу під час процесу екструзії.

Структурний аналіз показав майже однорідну морфологію зразків, без наявності повітряних включень у досліджуваних зразках. Така однорідність є важливим показником якості екструдованого матеріалу, оскільки відсутність газових порожнин сприяє підвищенню механічної міцності та оптичної прозорості виробів. Вид зразків під мікроскопом показаний на рис. 13. Арегування результатів показані в таблиці 7. На рис. 14 показаний графік коефіцієнтів якості кожного зразку п'ятого дослід [7].

Таблиця 7 – Арегування результатів на прозорості, оцінка суцільності та кількості повітряних включень шостого дослід

| № зразка | Оцінка прозорості |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|-------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                   | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                   |   | + |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                   |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                   |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                   |   |   |   |   |   |   |   | + |    |



Закінчення табл. 7

| № зразка | Оцінка суцільності                   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|----------|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 | +                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   | + |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      | + |   |   |   |   |   |   |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   | + |   |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| № зразка | Оцінка кількості повітряних включень |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|          | 1                                    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Зразок 1 |                                      |   |   |   | + |   |   |   |   |    |
| Зразок 2 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 3 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |
| Зразок 4 |                                      |   |   |   |   |   | + |   |   |    |
| Зразок 5 |                                      |   |   |   |   |   |   | + |   |    |

Джерело: розроблено авторами

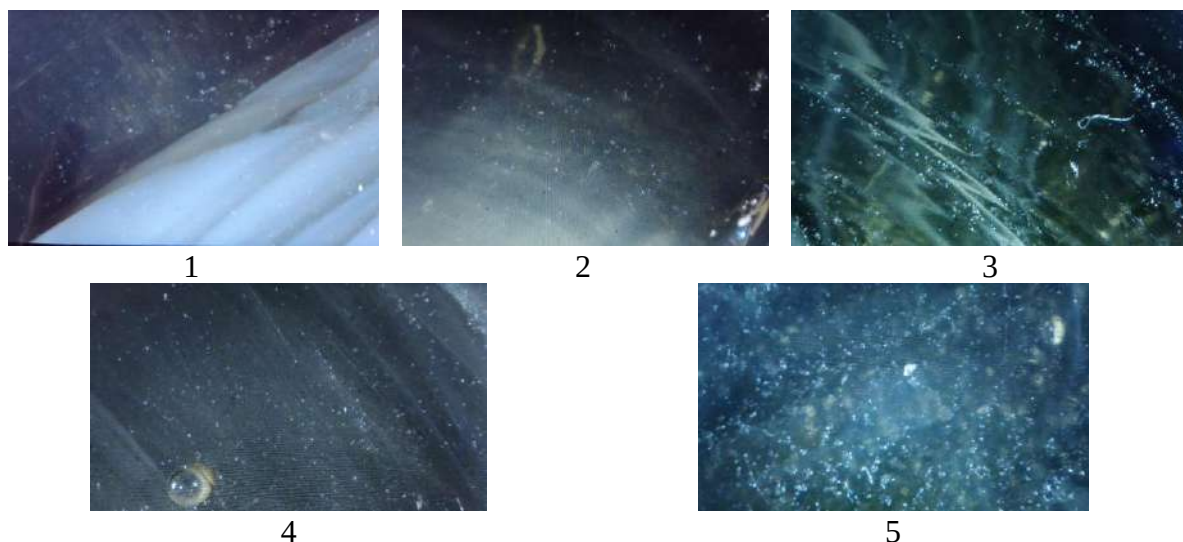


Рис. 13. Зразки під мікроскопом співвідношенням 70/30

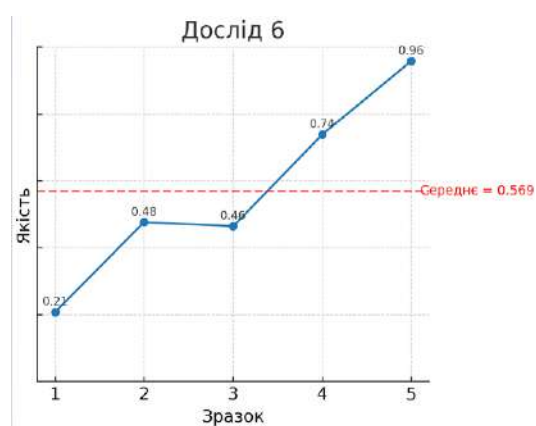


Рис. 14. Графік показників коефіцієнтів якості шостого дослід

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що прозорість та однорідність полімерних зразків на основі чистого та вторинного PET-G значною мірою залежать від порядку екструзії та співвідношення компонентів у об'ємі сировини. Зменшення інтенсивності помутніння у пізніших зразках свідчить про стабілізацію процесу та ефективне видалення газових включень.

На ранніх етапах екструзії спостерігались локальні помутніння, що були пов'язані з утворенням мікропор, залишковими легкими компонентами та інтенсивним охолодженням матеріалу. Оптимізація температурного режиму та параметрів пресування дозволила значно зменшити ці дефекти [8].

Структурний аналіз показав, що більшість досліджуваних зразків має майже однорідну структуру без повітряних включень. Це свідчить про високу ефективність процесу екструзії та потенціал для виробництва стабільного та чистого матеріалу.

Виявлено, що підвищення вмісту вторинного PET-G у суміші призводить до збільшення частоти помутнінь та утворення дефектів, але тільки до певного відсоткового значення вмісту вторинної сировини у первинній. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні співвідношення компонентів для досягнення необхідних експлуатаційних властивостей матеріалу. На рис. 15 показана якість зразків у кожному досліді [9].

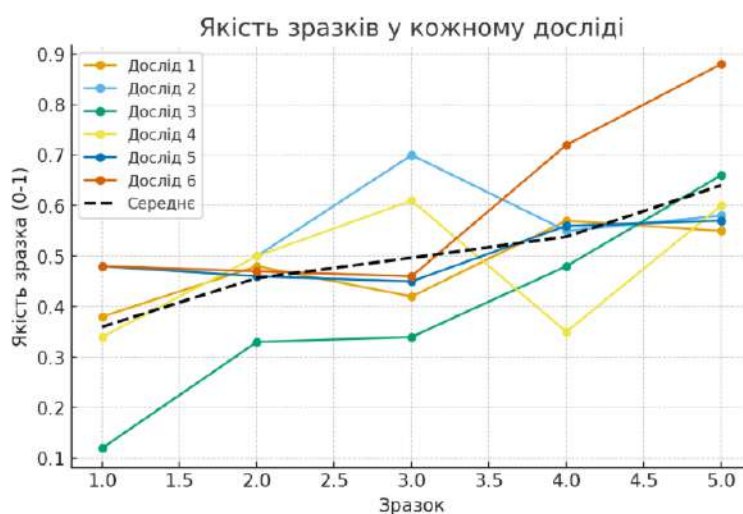


Рис. 15. Графік якості зразків у кожному досліді

Опираючись на результати отримані з шести дослідів (рис. 15), спостерігаємо, що досліді 1, 2 та 5 мають середні показники, у досліді 3 показники зразків 1-3 були нижчі за зразки 4-5 це обґрунтовано тим, що були присутні залишки сировини від попередніх дослідів які залишились на стінках циліндра, після чого були видавлені при формуванні зразка. Четвертий дослід демонструє зниження якості зразка 4, це обґрунтовано тим, що відбулося різке відведення тепла зі зразка, що своєю чергою погіршило його якість та властивості, частина первинного та вторинного PETG залишались у зоні нагріву та після підвищення швидкості при видавлюванні залишків сировини збільшилась кількість включень, це також вплинуло на погіршення показників характеристик та якості зразка [10].

Дослід 6 показує покращення результатів, збільшення вторинного PETG покращило якість зразків в порівнянні з попередніми дослідом. Результати досліді 6 є основою для подальшого вивчення та дослідження в цьому напрямку.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT – більш коректний переклад розширених анотацій з мови оригіналу на англійську мову. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### **Список використаних джерел**

1. Rahaf, A., Wisam, A. J., Hamna, A., & Eman, A. (2022). A revision for the different reuses of polyethylene terephthalate (PET) water bottles. *Sustainability*, 14(8), 4583. <https://doi.org/10.3390/su14084583>.

2. Sharon, B., Jennifer, S., Heather, W., & Ravi, J. (2010). An overview of the sustainability of solid waste management at military installations. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 12(3/4), 289–304. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2010.032534>.
3. Mario, G., & Francesca, V. (2020). *Analysis of the municipal solid waste management and treatment in Khartoum state and design of a mixed waste processing facility* (Master's thesis, Politecnico di Milano). <https://hdl.handle.net/10589/169977>.
4. Bajer, K. (2023). Post-consumer plastic waste management: From collection and sortation to mechanical recycling. *Energies*, 16(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/en16083504>.
5. Vigneshwaran, S., Dutta, O., Elnour, R., Balasubramanian, K., Singh, S., et al. (2020). Polymer recycling in additive manufacturing: An opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, 2, 11. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00012-0>.
6. Geena P., H. Arunav, S. Dwight, Madhav B. G., Madhav B. G., Ayona J., Deepa I. N. (2024). Advanc Paulose, G., Arunav, H., Dwight, S., Babu George, M., Babu George, M., Jothi, A., & Nair, D. I. (2024). Advancing sustainable practices in additive manufacturing: A comprehensive review on material waste recyclability. *Sustainability*, 16(23), 10246. <https://doi.org/10.3390/su162310246>.
7. Rusu, I.-C., Vintilă, A.-M., Cherecheș, D.-E., Barz, E., & Zaharia, C. (2025). Advancing sustainability in modern polymer processing: Strategies for waste resource recovery and circular economy integration. *Polymers*, 17(4), 522. <https://doi.org/10.3390/polym17040522>.
8. Acobs, G. P., Lankhorst, B. J., ten Cate, T., Sezen, M., & Ozkoc, G. (2021). Sustainable approach to produce 3D-printed continuous carbon fiber composites: A comparison of virgin and recycled PETG. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.26143>.
9. Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-García, E., Rodríguez-Santiago, M., & Martín-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.
10. Valvez, S., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2022). Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts. *Polymers*, 14(13), 2564. <https://doi.org/10.3390/polym14132564>.

### References

1. Rahaf, A., Wisam, A. J., Hamna, A., & Eman, A. (2022). A revision for the different reuses of polyethylene terephthalate (PET) water bottles. *Sustainability*, 14(8), 4583. <https://doi.org/10.3390/su14084583>.
2. Sharon, B., Jennifer, S., Heather, W., & Ravi, J. (2010). An overview of the sustainability of solid waste management at military installations. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 12(3/4), 289–304. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2010.032534>.
3. Mario, G., & Francesca, V. (2020). *Analysis of the municipal solid waste management and treatment in Khartoum state and design of a mixed waste processing facility* (Master's thesis, Politecnico di Milano). <https://hdl.handle.net/10589/169977>.
4. Bajer, K. (2023). Post-consumer plastic waste management: From collection and sortation to mechanical recycling. *Energies*, 16(8), 3504. <https://doi.org/10.3390/en16083504>.
5. Vigneshwaran, S., Dutta, O., Elnour, R., Balasubramanian, K., Singh, S., et al. (2020). Polymer recycling in additive manufacturing: An opportunity for the circular economy. *Materials Circular Economy*, 2, 11. <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00012-0>.
6. Geena P., H. Arunav, S. Dwight, Madhav B. G., Madhav B. G., Ayona J., Deepa I. N. (2024). Advanc Paulose, G., Arunav, H., Dwight, S., Babu George, M., Babu George, M., Jothi, A., & Nair, D. I. (2024). Advancing sustainable practices in additive manufacturing: A comprehensive review on material waste recyclability. *Sustainability*, 16(23), 10246. <https://doi.org/10.3390/su162310246>.
7. Rusu, I.-C., Vintilă, A.-M., Cherecheș, D.-E., Barz, E., & Zaharia, C. (2025). Advancing sustainability in modern polymer processing: Strategies for waste resource recovery and circular economy integration. *Polymers*, 17(4), 522. <https://doi.org/10.3390/polym17040522>.
8. Acobs, G. P., Lankhorst, B. J., ten Cate, T., Sezen, M., & Ozkoc, G. (2021). Sustainable approach to produce 3D-printed continuous carbon fiber composites: A comparison of virgin and recycled PETG. *Polymer Composites*. <https://doi.org/10.1002/pc.26143>.



9. Mercado-Colmenero, J. M., La Rubia, M. D., Mata-García, E., Rodríguez-Santiago, M., & Martín-Doñate, C. (2020). Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications. *Polymers*, 12(10), 2202. <https://doi.org/10.3390/polym12102202>.

10. Valvez, S., Silva, A. P., & Reis, P. N. B. (2022). Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts. *Polymers*, 14(13), 2564. <https://doi.org/10.3390/polym14132564>.

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.12.2025

UDC 678.027.32

**Ihor Petrenko<sup>1</sup>, Timur Hanieiev<sup>2</sup>, Maksym Bolotov<sup>3</sup>, Mykyta Stetsenko<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>assistant, Lecturer, Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [igor.petrenko0511@stu.cn.ua](mailto:igor.petrenko0511@stu.cn.ua) **ORCID** 0000-0002-8550-8318 **ResearcherID:** IQV-2134-2023

<sup>2</sup>candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [t.ganeev@stu.cn.ua](mailto:t.ganeev@stu.cn.ua) **ORCID** 0009-0006-2041-1685

<sup>3</sup>candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding and Construction  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [m.bolotov@stu.cn.ua](mailto:m.bolotov@stu.cn.ua) **ORCID** 0000-0002-0915-4132 **ResearcherID:** H-4183-2014

<sup>4</sup>bachelor, student of the MBA-251 group of the Department of Welding and Construction Technologies  
National University “Chernihiv Polytechnic” (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [malishkaliaia8@gmail.com](mailto:malishkaliaia8@gmail.com) **ORCID** 0009-0001-0863-4038

## STUDY OF STRUCTURAL AND QUALITATIVE CHANGES IN POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL WITH INCLUSIONS OF RECYCLED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE GLYCOL

*The article presents the results of a comprehensive experimental study examining the influence of primary PET-G and secondary rPET-G on the structural formation, optical transparency, and overall quality of polymer samples produced through extrusion. Six experimental series were conducted with recycled material content ranging from 5% to 30%. The findings show that the key quality parameters—such as haze formation, color stability, uniformity of the internal structure, and the presence of air inclusions—are determined not only by the proportion of rPET-G in the mixture but also by the thermal regime, extrusion sequence, and the overall stability of processing conditions.*

*The study demonstrates that insufficient temperature stabilization, non-uniform heating, residual material from previous cycles, and rapid cooling can significantly affect the properties of extruded samples. These factors contribute to structural heterogeneity, caramelization effects, and localized cloudiness within the polymer matrix. Detailed microscopic examination revealed that early-stage samples tend to accumulate micropores and air pockets, while optimized processing parameters noticeably reduce the intensity and frequency of such defects.*

*Moreover, the experiments confirm that careful adjustment of extrusion temperature, feed rate, and material preparation leads to improved structural homogeneity and enhanced transparency. The ability to nearly eliminate air inclusions in optimized regimes highlights the importance of process refinement for achieving stable material properties, even when using a considerable portion of recycled PET-G.*

*Overall, the results substantiate the feasibility of incorporating rPET-G without a significant decline in optical or mechanical quality, provided that extrusion parameters are carefully controlled. This reinforces the potential of recycled PET-G as a valuable component in polymer production, supporting sustainable manufacturing practices and contributing to the development of an efficient closed-loop recycling system. The study forms a solid basis for further technological optimization, encouraging broader industrial application of recycled polymer materials.*

**Keywords:** Extrusion; polymeric materials; PET-G; rPET-G; variability.

**Fig.:** 14. **Table:** 6. **References:** 10.

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-156-164](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-156-164)

УДК 004.02

**Наталія Олександрівна Солодка<sup>1</sup>, Олександр Вікторович Троцило<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних систем

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: [n.o.solodka@ust.edu.ua](mailto:n.o.solodka@ust.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7545-4969>, SCOPUS ID: 57217833042

<sup>2</sup>аспірант кафедри Інформаційних систем

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

E-mail: [oleksandr\\_troshchylo@udhtu.edu.ua](mailto:oleksandr_troshchylo@udhtu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6119-0220>

### ВИКОРИСТАННЯ ЖАДІБНИХ ТА ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ СТАНЦІЙ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Дослідження присвячене вирішенню актуальної проблеми оптимізації розміщення базових станцій мобільних мереж поколінь 4G/5G. Зростання навантаження на мережі та вимоги до якості покриття обумовлюють необхідність пошуку ефективних методів планування інфраструктури. У роботі проведено комплексний аналіз ефективності жадібних та генетичних алгоритмів для задачі оптимального розміщення базових станцій. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення на Python, здатне генерувати тестові набори даних різного масштабу та моделювати процес розміщення станцій. Отримані результати демонструють чіткий компроміс між точністю та швидкодією: жадібні алгоритми забезпечують швидке рішення для великомасштабних задач, тоді як генетичні алгоритми досягають кращої якості рішення при прийнятному часі обчислення.

**Ключові слова:** жадібні алгоритми; генетичні алгоритми; оптимізація; базові станції; мобільні мережі; 4G/5G.

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.:15.

**Актуальність теми дослідження.** Оптимізація інфраструктури мобільних мереж є критично важливим напрямком для забезпечення сталого розвитку цифрової економіки та суспільства. Стрімке зростання трафіку даних, поява нових послуг (Інтернет речей, машинне спілкування, віртуальна реальність) та перехід до стандартів 5G і майбутніх поколінь мереж різко підвищують вимоги до якості, місткості та надійності телекомунікаційних систем. Традиційні підходи до планування мереж, що базуються на емпіричних правилах або точних, але обчислювально складних методах (наприклад, цілочислові програмування), стають неефективними для вирішення сучасних задач великого масштабу та високої динамічності. Це створює нагальну потребу у впровадженні передових евристичних та метаевристичних методів, здатних забезпечити практичне, швидке та економічно обґрунтоване рішення проблеми розміщення базових станцій.

Практичне значення даного дослідження полягає у безпосередньому впливі на економічну ефективність операторів зв'язку та якість послуг для кінцевого користувача. Мінімізація витрат на розгортання та експлуатацію мережі при одночасному забезпеченні повного та якісного покриття є ключовим чинником конкурентоспроможності. Розроблений у роботі інструментарій та проведений порівняльний аналіз закладають науково-методичну основу для прийняття обґрунтованих рішень на етапі проектування мереж, що відповідає сучасним тенденціям автоматизації та оптимізації телекомунікаційної індустрії. Таким чином, тема дослідження знаходиться на перетині актуальних потреб галузі зв'язку та перспективних напрямів розвитку інформатики та дослідження операцій.

**Постановка проблеми.** Планування мережевої інфраструктури для сучасних бездротових систем зв'язку (4G/5G та майбутніх поколінь) є комплексним завданням, що потребує врахування низки техніко-економічних факторів. Основною складовою цього процесу є визначення оптимальних місць розміщення базових станцій, що дозволить забезпечити якісне покриття з мінімальними капітальними та експлуатаційними витратами [1; 2].

Класичні методи точного розв'язання, зокрема задачі цілочислового лінійного програмування, хоча й гарантують теоретично оптимальний результат, виявляються обчислюва-

льно неефективними при зростанні розмірності завдання, що характерно для реальних міських та регіональних мереж [3]. У зв'язку з цим пошук практично застосовних підходів зосереджений на використанні ефективних евристичних та метаевристичних процедур.

Одним із таких підходів є жадібні алгоритми, які будують рішення крок за кроком, щоразу обираючи локально найкращий варіант. Це забезпечує високу швидкість роботи, однак отримане рішення часто виявляється далеким від глобального оптимуму через відсутність огляду всієї множини можливих комбінацій [4]. З іншого боку, генетичні алгоритми, що належать до більш широкого класу методів, здатні досліджувати простір рішень більш повно, імітуючи процес природної еволюції. Їхня ефективність, проте, суттєво залежить від адекватного підбору параметрів (розміру популяції, ймовірностей кросовера та мутації) і потребує значних обчислювальних ресурсів, особливо для великомасштабних задач [5].

Таким чином, виникає суттєва практична проблема, яка полягає в необхідності знаходження балансу між трьома ключовими аспектами: точність (якість) рішення – здатність алгоритму мінімізувати кількість станцій та загальну вартість інфраструктури при забезпеченні цільового рівня покриття; обчислювальна ефективність (швидкодію) – час, необхідний для отримання готового плану розгортання, що є критичним при роботі з великими наборами даних або в умовах динамічного планування; адаптивність до умов задачі – здатність методу ефективно працювати в завданнях різного масштабу (від локальних ділянок до масштабів міста) та враховувати різноманітні обмеження.

Відповідно, основним завданням цієї роботи є системне порівняння продуктивності двох перспективних класів алгоритмів – жадібних та генетичних – для вирішення задачі оптимального розміщення базових станцій. Порівняння має охопити аналіз якості фінальних рішень (кількість станцій, відсоток покриття, вартість), швидкості їх отримання для задач різної розмірності, а також оцінку практичної придатності кожного підходу в умовах, що моделюють реальні сценарії планування мереж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Актуальність проблеми оптимального планування мережевої інфраструктури обумовлює значну кількість наукових праць, присвячених застосуванню різноманітних евристичних методів для розв'язання задач покриття та розміщення. У контексті мобільних мереж 4G/5G дослідники зосереджуються на пошуку рішень, що поєднують прийнятну якість з обчислювальною ефективністю.

Особливу увагу в сучасній літературі приділено генетичним алгоритмам (ГА) як потужному інструменту для складних комбінаторних оптимізацій. Наприклад, дослідження [6] демонструє їхню ефективність для завдань покриття в мережах 5G, де для випадків з понад 200 потенційними локаціями вдається досягти 94-97 % від теоретичного оптимуму, причому час обчислень виявляється у 3-5 разів меншим у порівнянні з методами цілочислового програмування. Автори наголошують, що ключовим для успіху є ретельний підбір параметрів ГА, таких як схема селекції та оператори кросовера.

Паралельно розвиваються дослідження, спрямовані на вдосконалення простіших, але швидших підходів. В роботі [7] запропоновано модифікацію класичного жадібного алгоритму, яка інтегрує в процес вибору не лише критерій покриття, а й вартісні та енергетичні фактори. Така модифікація дозволила знизити сукупні витрати на розгортання на 15-20 % порівняно з базовими жадібними стратегіями, зберігаючи при цьому їхню основну перевагу – високу швидкодію.

Широкий порівняльний огляд різних евристичних методів, проведений у [8] на основі реальних міських даних, дає змогу зробити низку важливих висновків. Зокрема, автори зазначають, що генетичні алгоритми посідають провідні позиції за якістю рішення для завдань середньої та великої складності. Жадібні алгоритми, у свою чергу, показують стабільну ефективність і передбачувану швидкість роботи незалежно від масштабу. Особливо

цікавими є результати для гібридних підходів, які поєднують швидкість жадібної ініціалізації з потужністю локального пошуку, досягаючи 96-98 % від оптимального покриття.

Окремим напрямком є розробка методів, здатних реагувати на зміни в мережі. У дослідженні [9] представлено адаптивну версію генетичного алгоритму, яка може динамічно корегувати конфігурацію розміщення станцій у відповідь на флуктуації трафіку або появу нових перешкод, підтримуючи заданий рівень сервісу.

Загальна тенденція, що простежується в сучасних наукових працях [10; 11], підтверджує високу практичну цінність генетичних алгоритмів для оптимізації телекомунікаційної інфраструктури, особливо в ситуаціях, коли необхідно знайти робочий компроміс між якістю кінцевого рішення та витратами обчислювальних ресурсів на його пошук. Однак, незважаючи на значний прогрес, питання комплексної оцінки та прямого порівняння ефективності різних класів алгоритмів на єдиній моделі та наборах даних залишається актуальним.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на значний обсяг існуючих публікацій, присвячених оптимізації розміщення базових станцій, залишаються недослідженими або недостатньо вирішеними кілька ключових аспектів загальної проблеми. По-перше – це адаптивність до суворо динамічних умов. Більшість існуючих моделей, включно з розглянутими в даній статті, розглядають задачу в статичній постановці. Однак реальні мережі функціонують в умовах постійних змін: мігруючий трафік користувачів, тимчасові перешкоди, вихід обладнання з ладу, поява нових сервісів з різними вимогами. Відсутніми залишаються ефективні онлайн-алгоритми та моделі, здатні динамічно переналаштовувати конфігурацію мережі в реальному часі або прогнозувати оптимальну топологію на основі поточних даних телеметрії. Другим аспектом є інтеграція багатокритеріальної оптимізації та реальних обмежень. Поточна модель зосереджена на мінімізації вартості за умови покриття. Проте практичне планування вимагає одночасного врахування десятків критеріїв: енергоспоживання, інтерференція між сусідніми станціями, навантаження на backhaul-мережу, вимоги до затримки для урізноманітнених сервісів 5G, а також адміністративних та екологічних обмежень. Комплексне вирішення такої багатовимірної задачі з нетривіальними залежностями між параметрами залишається відкритою проблемою. Також доцільно звернути увагу на відсутність стандартизованих гібридних підходів. Хоча в літературі окремо досліджуються жадібні, генетичні та інші алгоритми, методика системного конструювання гібридних рішень, які б автоматично поєднували швидкість локального пошуку з глобальними можливостями метаевристик, розроблена недостатньо. Питання вибору моменту перемикання між алгоритмами, обміну інформацією між ними та створення адаптивних каркасів для їхньої взаємодії потребує подальшого поглибленого вивчення.

Таким чином, дана стаття концентрується на вирішенні важливої, але часткової задачі – порівняльному аналізі класичних підходів у чітко визначених умовах. Виділені вище напрями формують контекст для подальших, більш комплексних досліджень у цій галузі.

**Формулювання мети дослідження.** Метою даного дослідження є комплексний аналіз ефективності жадібних та генетичних алгоритмів для задачі оптимального розміщення базових станцій мобільних мереж у порівнянні за критеріями якості рішення та швидкодії. Дослідження спрямоване на теоретичне обґрунтування застосування обох підходів, зокрема їх переваг у різних сценаріях використання, а також практичну перевірку якості рішень через експериментальне порівняння за наступними критеріями: кількість необхідних базових станцій; відсоток покриття користувачів; вартість розгортання мережі; часові витрати на обчислення; стабільність рішень при багаторазовому запуску.

Метою дослідження є формулювання чітких критеріїв, що визначають умови доцільності застосування кожного з алгоритмів та випадки, у яких перевагу слід надавати комбінованим підходам.

**Математична модель задачі.** Задача оптимального розміщення базових станцій формулюється як задача мінімізації вартості розгортання мережі за умови повного покриття всіх користувачів. Нехай  $U=\{1,2,\dots,m\}$  – множина користувачів,  $S=\{1,2,\dots,n\}$  – множина кандидатних позицій для розміщення базових станцій.

Цільова функція мінімізації вартості:

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j,$$

де  $c_j$  – вартість встановлення станції на позиції  $j$ ,  $x_j \in \{0,1\}$  – бінарна змінна, що позначає вибір станції  $j$ .

Умови покриття користувачів:

$$\sum_{j \in N(i)} x_j \geq 1, \quad \forall i \in U,$$

де  $N(i)$  – множина станцій, здатних обслуговувати користувача  $i$  в межах радіуса покриття  $R$ :

$$N(i) = \{j \in S: d(i,j) \leq R\},$$

де  $d(i,j)$  – відстань між користувачем  $i$  та станцією  $j$ .

**Методика дослідження.** У межах цього дослідження розроблено спеціалізовану програму на Python, яка дозволяє порівнювати ефективність жадібного та генетичного алгоритмів для задачі оптимального розміщення базових станцій мобільних мереж.

Жадібний алгоритм реалізовано з використанням стратегії послідовного вибору станцій з максимальним покриттям нових користувачів:

$$j^* = \arg \max_{j \in S} \frac{\Delta \text{cov}(j)}{c_j},$$

де  $\Delta \text{cov}(j)$  – приріст кількості покритих користувачів при додаванні станції  $j$ .

Генетичний алгоритм реалізовано з наступними характеристиками: бінарний вектор довжиною  $n$ ; функція пристосованості:  $f(x) = \text{coverage}(x) - \alpha \cdot \text{cost}(x) - \beta \cdot \text{stations}(x)$ ; відбір: турнірний з розміром турніру 3; кросовер: одноточковий з ймовірністю 0,8; мутація: інверсія бітів з ймовірністю 0,1. Ваговий коефіцієнт  $\alpha$  визначає, наскільки сильно вартість розгортання ( $\text{cost}(x)$ ) впливає на оцінку особи. Велике значення  $\alpha$  робить алгоритм більш "економічним", караючи за високі витрати. Коефіцієнт  $\alpha$  обирався нормалізованим до діапазону витрат, щоб штраф був порівняним з винагородою за покриття. Ваговий коефіцієнт  $\beta$  (коефіцієнт штрафу за кількість станцій) відповідає за штрафування рішень з надмірною кількістю базових станцій ( $\text{stations}(x)$ ), сприяючи більш компактним конфігураціям мережі. Його визначали аналогічно, але нормалізували до загальної кількості кандидатних позицій. Таке масштабування забезпечує, що штраф за додавання ще однієї станції зменшується для більших задач, що є логічним.

Для забезпечення ефективності на різних масштабах задач реалізовано автоматичне налаштування параметрів генетичного алгоритму (параметри «розмір популяції», «кількість поколінь» і «швидкість мутації» змінюються залежно від кількості кандидатних позицій, кількості користувачів, складності простору пошуку): для малих задач ( $n < 100$ ): популяція 100, генерацій 50; для середніх задач ( $100 \leq n < 200$ ): популяція 150, генерацій 80; для великих задач ( $n \geq 200$ ): популяція 200, генерацій 120.

У межах експериментальної частини дослідження було розроблено програмний комплекс, основним завданням якого є створення синтетичних моделей середовища для тестування алгоритмів. Цей комплекс автоматично формує набори вхідних даних трьох

категорій складності – невеликі, проміжні та об'ємні. Кожен набір включає координати абонентів та можливих точок встановлення базових станцій, випадково розподілених у межах заданої географічної зони.

Для кожного зі згенерованих сценаріїв програма послідовно запускає обидва алгоритмічні підходи – жадібний та генетичний – з метою знаходження набору станцій, що задовольняє умовам покриття. У процесі роботи фіксуються чотири основні групи метрик, що характеризують результати: чисельність відібраних базових станцій, частка обслугованих користувачів (у відсотках), сумарні витрати на впровадження запропонованої інфраструктури, процесорний час, витрачений кожним методом на пошук рішення.

Наукова новизна представленого підходу полягає у запропонованій авторській методиці адаптивного визначення параметрів генетичного алгоритму (розмір популяції, кількість поколінь) залежно від масштабу задачі (кількість користувачів та кандидатних позицій). Це дозволяє автоматизувати процес налаштування та забезпечити стабільну ефективність алгоритму для різних за складністю сценаріїв планування без необхідності ручного підбору параметрів для кожного випадку.

**Результати дослідження.** Проведене дослідження демонструє ключові відмінності між жадібними та генетичними алгоритмами для задачі оптимального розміщення базових станцій. Експерименти проводились з використанням 5 незалежних запусків для кожної конфігурації задачі з метою оцінки стабільності алгоритмів. Отримані результати підтверджують теоретичні припущення щодо компромісу між точністю та швидкістю. Практичні результати дослідження представлено в табл. 1.

*Таблиця 1 – Порівняльні результати ефективності алгоритмів*

| Масштаб задачі   | Алгоритм   | Кількість станцій | Покриття, % | Вартість, у/о | Час, с | Стабільність, % |
|------------------|------------|-------------------|-------------|---------------|--------|-----------------|
| Мала (20/30)     | Жадібний   | 8                 | 100         | 1024          | 0,002  | 95,2            |
| Мала (20/30)     | Генетичний | 7                 | 100         | 845           | 1,234  | 97,8            |
| Середня (50/80)  | Жадібний   | 19                | 99,2        | 2156          | 0,005  | 93,5            |
| Середня (50/80)  | Генетичний | 15                | 99,8        | 1789          | 8,456  | 96,4            |
| Велика (200/300) | Жадібний   | 41                | 98,5        | 3987          | 0,015  | 91,8            |
| Велика (200/300) | Генетичний | 35                | 99,3        | 3456          | 45,123 | 94,7            |

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз стабільності алгоритмів показав, що генетичний алгоритм демонструє вищу відтворюваність результатів (стабільність 94,7...97,8 %) порівняно з жадібним алгоритмом (91,8...95,2 %). Для генетичного алгоритму це пояснюється його стохастичною природою, однак великий розмір популяції та турнірний відбір забезпечують високу узгодженість фінальних рішень при багаторазовому запуску. Невелика варіативність у результатах жадібного алгоритму (що є детермінованим в класичній формі) виникала в експериментах у випадках, коли на певному кроці кілька кандидатних станцій мали абсолютно однакову ефективність за обраним критерієм (максимальне покриття нових користувачів на одиницю вартості). У такій ситуації для усунення невизначеності реалізація алгоритму здійснювала випадковий вибір серед "рівноцінних" кандидатів, що та призводило до розбіжностей між окремими запусками.

Аналіз збіжності генетичного алгоритму представлений на рис. 1, де показана динаміка покращення якості рішення залежно від кількості поколінь. Для різних масштабів задач спостерігається така закономірність: малі задачі: алгоритм збігається до 30-40 покоління, середні задачі: збіжність досягається на 60-70 покоління, великі задачі: потрібно 90-110 поколінь для стабілізації рішення.

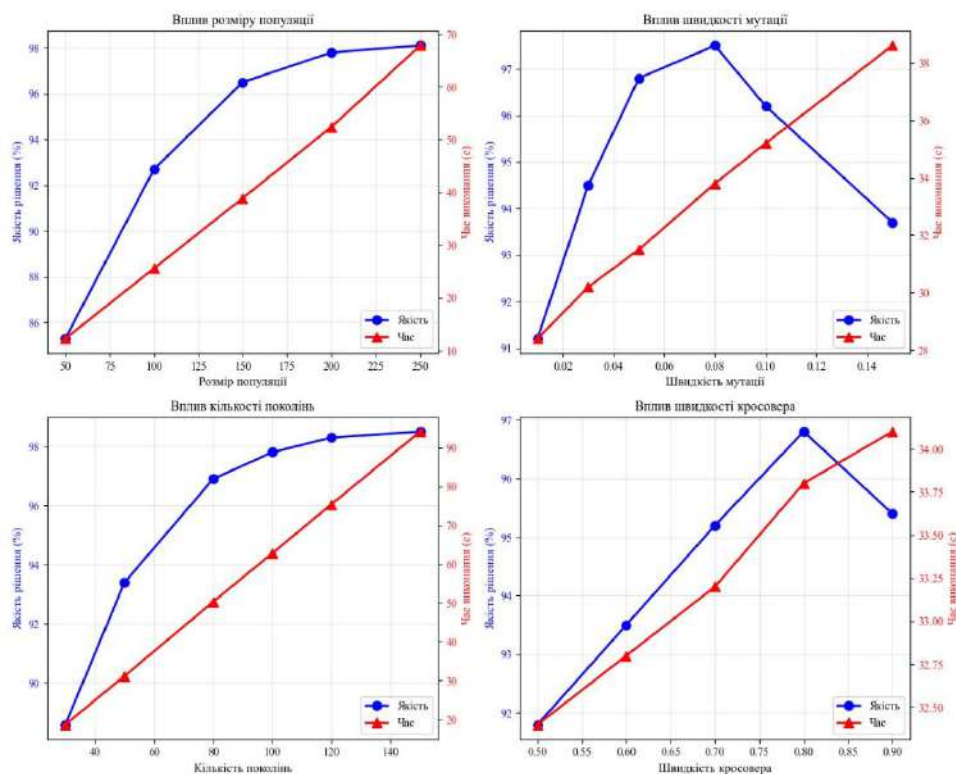


Рис. 1. Аналіз чутливості генетичного алгоритму до параметрів  
Джерело: розроблено авторами.

Кількість ітерацій жадібного алгоритму залежить від розміру задачі та становить: для малих задач 8-12 ітерацій, для середніх 18-25 ітерацій і для великих - 40-50 ітерацій.

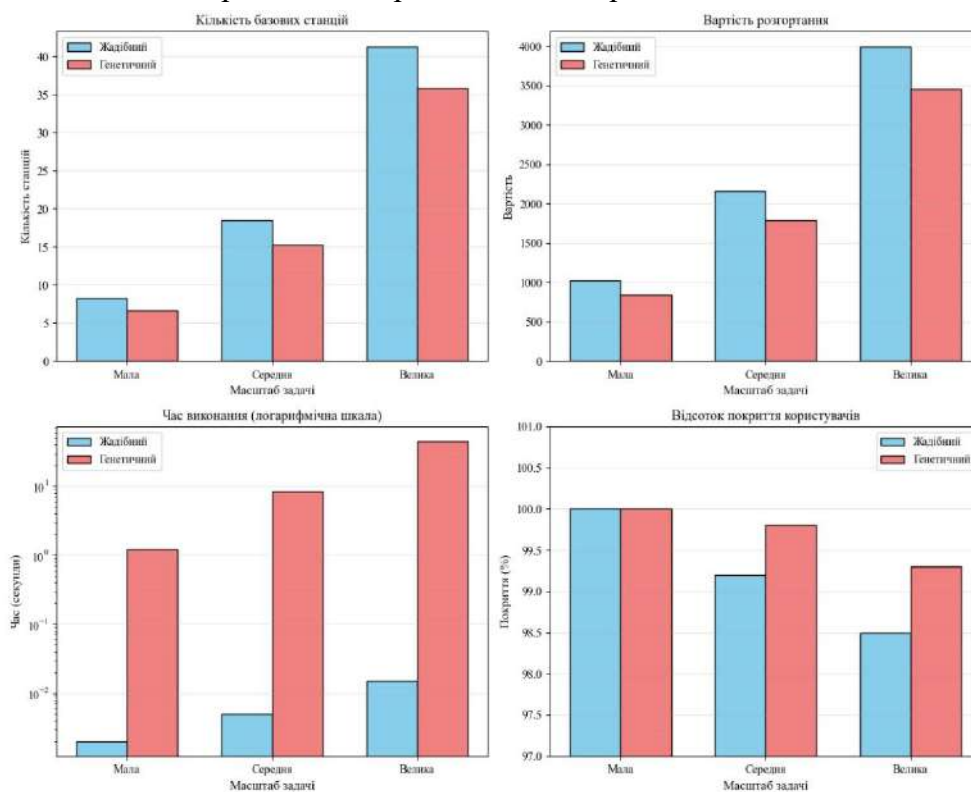


Рис. 2. Порівняльна ефективність жадібних та генетичних алгоритмів  
Джерело: розроблено авторами

Важливо відзначити, що жадібний алгоритм завжди зупиняється після досягнення повного покриття або коли жодна додаткова станція не покращує покриття, тоді як генетичний алгоритм виконує фіксовану кількість поколінь, визначену автоматичним налаштуванням параметрів.

Часова ефективність алгоритмів демонструє експоненційну залежність від розміру задачі для генетичного алгоритму та лінійну для жадібного алгоритму. Для великої задачі (200 користувачів, 300 кандидатів) генетичний алгоритм виконує приблизно 3000 оцінок пристосованості ( $200 \text{ індивідів} \times 120 \text{ поколінь} \times 0,125 \text{ середня кількість обчислень}$ ), тоді як жадібний алгоритм виконує лише 40-50 оцінок.

Для оцінки статистичної значущості різниць у результатах був застосований критерій Стюдента. Слід зазначити, що обсяг вибірки (5 незалежних запусків для кожної конфігурації) є обмеженням даного дослідження та може недостатньо повно відображати дисперсію, притаманну стохастичному генетичному алгоритму. Однак, в рамках цієї порівняльної роботи, де основним фокусом була демонстрація чіткого компромісу між якістю та швидкістю для двох класів алгоритмів, отримані значення  $p < 0,05$  дозволяють з певною впевненістю констатувати наявність систематичної різниці між середніми значеннями ключових показників. Для підтвердження абсолютної стійкості методу та отримання високої статистичної потужності в подальших дослідженнях необхідно використовувати значно більшу кількість ітерацій (наприклад, 30 і більше) та розширений статистичний аналіз.

**Висновки.** Проведене дослідження та експериментальні розрахунки дозволили виявити та систематизувати основні закономірності у використанні жадібних та генетичних алгоритмів для оптимізації розгортання базових станцій мобільних мереж. Отримані результати підтверджують, що кожен з підходів має чітку область ефективного застосування, яка визначається співвідношенням вимог до точності рішення та обмежень по часу обчислення.

Генетичні алгоритми продемонстрували здатність знаходити високоякісні, близькі до оптимальних, рішення для завдань малої та середньої розмірності (до 100-200 кандидатних позицій). Їхня основна сила полягає в глобальному дослідженні простору рішень, що дозволяє суттєво мінімізувати як кількість станцій, так і загальні капітальні витрати, що є критично важливим для обґрунтованого стратегічного планування [6, 10].

На противагу цьому, жадібні алгоритми виявилися незамінним інструментом для опрацювання великомасштабних сценаріїв, де час отримання рішення є пріоритетним фактором. Незважаючи на те, що точність їхніх рішень може поступатися альтернативному методу на 15...25 % за вартістю, лінійна швидкодія забезпечує практичну придатність для оперативного планування, інтерактивного моделювання або роботи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів [4; 7].

Розроблений у межах роботи програмний інструмент став не лише засобом верифікації теоретичних гіпотез, але й універсальною платформою для порівняльного аналізу. Він наочно ілюструє фундаментальний компроміс між якістю та швидкістю, надаючи інженерам-проектувальникам чіткі критерії для вибору алгоритму в залежності від конкретних умов задачі: вимог до бюджету, термінів планування та масштабу мережі.

Перспективи подальших досліджень лежать в площині розвитку адаптивних гібридних систем, які б інтелектуально комбінували швидкість жадібної ініціалізації з потужністю генетичного пошуку. Також актуальним є вдосконалення генетичних алгоритмів через включення предметно-орієнтованих евристик, що враховують реальні технічні та економічні обмеження телекомунікаційних систем [5; 9], та автоматизацію підбору їхніх параметрів для різних класів оптимізаційних задач.



### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів**

Під час написання цього матеріалу автор(и) використовували Chat GPT для автоматизації процесу верстки статті та отримання коректного перекладу іншомовних публікацій.

Після використання Chat GPT автор(и) переглянув(ли) та відредагував(ли) зміст за потреби та взяв(ли) на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### **Список використаних джерел**

1. Солодка, Н. О., & Трошило, О. В. (2025). Оптиміальне проектування базових станцій мобільних мереж. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 1(92, ч. 2), 210–214.
2. Солодка, Н. О., & Трошило, О. В. (2025). Використання жадібних алгоритмів для оптимального проектування базових станцій мобільних мереж. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 4(153), 265–271.
3. Fischetti, M., & Ljubić, I. (2021). *Integer programming for large-scale networks*. Wiley.
4. Wang, L., & Kulkarni, S. (2019). Greedy algorithms in telecommunications. In *Proceedings of the IEEE International Conference* (pp. 33–37). IEEE Press.
5. Kosolap, A. I. (2023). *Dynamic network optimization*. Dnipro: UDHTU.
6. Zhang, Y., & Li, W. (2022). *Genetic algorithms for 5G network planning*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(3), 45–59.
7. Kovalenko, O., & Petrov, V. (2021). Cost-aware greedy algorithm for base station placement. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(4), 112–125.
8. Schmidt, M., & König, R. (2020). Comparative analysis of heuristic methods for 5G networks. *Journal of Network Optimization*, 7(2), 78–94.
9. Chen, L., & Watanabe, K. (2023). Adaptive genetic algorithms for dynamic networks. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 33–47.
10. Ivanov, S., & Petrenko, O. (2022). *Heuristic methods in telecommunications*. Springer.
11. Park, J., & Kim, S. (2021). *Rapid network planning using evolutionary algorithms*. Elsevier.
12. Chen, X. (2021). *Optimization in wireless networks*. Springer.
13. Wang, L. (2022). *Genetic algorithms for network design*. IEEE Press.
14. Kumar, A. (2023). *Large-scale network optimization*. Elsevier.
15. Francois, P., & Dubois, E. (2023). *Terrain-aware optimization in mobile networks*. CRC Press.

### **References**

1. Solodka, N. O., & Troshchylo, O. V. (2025). Optymalne proiektuvannia bazovykh stantsii mobilnykh merezh [Optimal design of mobile network base stations]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu - Herald of Kherson National Technical University*, 1(92), Pt. 2), 210–214.
2. Solodka, N. O., & Troshchylo, O. V. (2025). Vykorystannia zhadibnykh alhorytmiv dlia optymalnoho proiektuvannia bazovykh stantsii mobilnykh merezh [Use of greedy algorithms for optimal design of mobile network base stations]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho - Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 4(153), 265–271.
3. Fischetti, M., & Ljubić, I. (2021). *Integer programming for large-scale networks*. Wiley.
4. Wang, L., & Kulkarni, S. (2019). Greedy algorithms in telecommunications. In *Proceedings of the IEEE International Conference* (pp. 33–37). IEEE Press.
5. Kosolap, A. I. (2023). *Dynamic network optimization*. Dnipro: UDHTU.
6. Zhang, Y., & Li, W. (2022). *Genetic algorithms for 5G network planning*. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(3), 45–59.
7. Kovalenko, O., & Petrov, V. (2021). Cost-aware greedy algorithm for base station placement. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(4), 112–125.
8. Schmidt, M., & König, R. (2020). Comparative analysis of heuristic methods for 5G networks. *Journal of Network Optimization*, 7(2), 78–94.
9. Chen, L., & Watanabe, K. (2023). Adaptive genetic algorithms for dynamic networks. *Mobile Networks and Applications*, 28(1), 33–47.

10. Ivanov, S., & Petrenko, O. (2022). *Heuristic methods in telecommunications*. Springer.
11. Park, J., & Kim, S. (2021). *Rapid network planning using evolutionary algorithms*. Elsevier.
12. Chen, X. (2021). *Optimization in wireless networks*. Springer.
13. Wang, L. (2022). *Genetic algorithms for network design*. IEEE Press.
14. Kumar, A. (2023). *Large-scale network optimization*. Elsevier.
15. Francois, P., & Dubois, E. (2023). *Terrain-aware optimization in mobile networks*. CRC Press.

Дата першого надходження статті до видання: 03.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.12.2025

UDC 004.02

**Nataliia Solodka<sup>1</sup>, Oleksandr Troshchylo<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Systems  
Ukrainian State University of Science and Technology (Ukraine, Dnipro)

E-mail: [n.o.solodka@ust.edu.ua](mailto:n.o.solodka@ust.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7545-4969>, SCOPUS ID: [57217833042](https://scopus.id/57217833042)

<sup>2</sup>Postgraduate Student at the Department of Information Systems

Ukrainian State University of Science and Technology (Ukraine, Dnipro)

E-mail: [oleksandr\\_troshchylo@udhtu.edu.ua](mailto:oleksandr_troshchylo@udhtu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6119-0220>

## USE OF GREEDY AND GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMAL MOBILE NETWORK BASE STATION PLACEMENT

This study addresses the critical challenge of optimizing base station placement for 4G/5G mobile networks. The exponential growth in network load and stringent quality-of-service requirements necessitate the development of efficient infrastructure planning methods. The paper presents a comprehensive comparative analysis of the effectiveness of greedy and genetic algorithms for solving the optimal base-station placement problem. Specialized software was developed in Python, capable of generating test datasets of various scales and simulating the station deployment process. The obtained results demonstrate a clear trade-off between accuracy and computational efficiency. Greedy algorithms provide rapid solutions for large-scale deployment scenarios, making them suitable for initial planning and real-time adjustments. In contrast, genetic algorithms achieve superior solution quality with near-optimal coverage and cost metrics, albeit at a higher computational cost, which is acceptable for strategic network design and offline planning. The developed tool allows for the evaluation of both approaches across different urban and regional terrain models, considering parameters such as user density, coverage radius, and deployment budget. The findings provide clear practical guidelines for telecommunications engineers: employing greedy heuristics for scalability and speed in expansive or dynamic environments, and leveraging genetic algorithms for precision in complex, cost-sensitive, or capacity-critical deployments. This research contributes a methodological framework and a software prototype for data-driven optimization in modern mobile network infrastructure planning, directly supporting the cost-effective rollout of advanced wireless technologies.

**Keywords:** greedy algorithms, genetic algorithms, optimization, base stations, mobile networks, 4G/5G, network planning.

Fig.: 2. Table: 1. References: 15.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-165-186](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-165-186)

УДК: 004.942

**Владислав Дмитрович Байда<sup>1</sup>, Олександр Анатолійович Велігорський<sup>2</sup>**<sup>1</sup> аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем  
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)**E-mail:** [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua) **ORCID:** 0009-0004-2172-8057**Google Scholar:** <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ><sup>2</sup> професор кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки  
Національного університету «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)**E-mail:** [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua) **ORCID:** 0000-0002-8256-7339**Google Scholar:** <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАЗИТНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ГЕНЕТИЧНИМ АЛГОРИТМОМ

У статті представлено уточнення паразитних параметрів математичної моделі перетворювача постійного струму шляхом застосування генетичного алгоритму, з метою подальшого створення високоточних цифрових двійників для діагностики обладнання силової електроніки. Запропоновано підхід до ідентифікації семи паразитних параметрів моделі перетворювача постійного струму, що знижує напругу, на основі експериментальних вимірювань струму через індуктивність та напруги на конденсаторі фільтру. Використання генетичного алгоритму з багатокритеріальною функцією пристосованості дозволило досягти симетричних відхилень паразитних параметрів моделі від реальних вимірюваних сигналів, що забезпечує можливість встановлення єдиного порогового значення для методології діагностики. Результати заповнюють прогалину у застосуванні генетичних алгоритмів для багатопараметричної оптимізації цифрових двійників силової електроніки.

**Ключові слова:** генетичний алгоритм; моделювання; кіберфізична система; апаратне забезпечення; цифровий двійник.

Рис.: 8. Табл.: 8. Бібл.: 37.

**Актуальність теми дослідження.** Сучасна силова електроніка переживає період технологічного розвитку, де перетворювачі постійного струму, які підвищують або знижують напругу відіграють критичну роль у системах енергозабезпечення від малопотужних зарядних пристроїв для портативної електроніки до систем живлення комплексів та центрів обробки даних з потужністю десятки кВт. Точність математичних моделей цих перетворювачів безпосередньо визначає ефективність діагностичних систем, прогнозування відмов та забезпечення безперебійної роботи обладнання. За даними дослідження 2024 року, компанії зі списку Fortune Global 500 щорічно втрачають \$1.4 трильйона через незаплановані простой обладнання, що становить 11 % річного обороту та в більшості секторів економіки перевищує показники минулих років [0]. В автомобільній та важких промисловостях кожна година простою коштує, відповідно, вдвічі та вчетверо більше за аналогічний проміжок часу у 2019 році [0].

Простой обладнання дуже часто викликані поламаками обладнання. Відомі дослідження показують, що найбільш частими є відмови, пов'язані з алюмінієвими електролітичними конденсаторами (близько 50% відмов), а також напівпровідниковими приладами (IGBT, MOSFET – близько 34 % відмов) [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]. Загальна частка поламок силових систем (інвертори та перетворювачі напруги), за результатами, наведеними в дослідженні [Помилка! Джерело посилання не знайдено.], доходить до 27% від усіх відмов у вітрових турбінах на суші, до 28 % – у сонячних фотоелектричних системах, та до 12 % – в електромобілях.

Для зменшення часу простою та упереджувальної заміни обладнання, що скоро може вийти з ладу, останніми роками значного розвитку набула концепція цифрових двійників для пристроїв силової електроніки. Цифровий двійник являє собою віртуальну репліку (програмну модель) фізичного пристрою, що оновлюється в реальному часі на основі даних з датчиків та дозволяє прогнозувати поведінку системи, виявляти аномалії та оцінювати стан та залишковий ресурс фізичних компонентів [4]. За оцінками [5], впровадження цифрових двійників також надає додаткові вигоди під час розробки нових продуктів: скорочення загального часу розробки на 20-50 %, зменшення кількості дорогих прототипів (часто з 2-3 до 1), а також зниження на 25 % проблем з якістю продукту при

запуску виробництва. Згідно з оцінками презентації [6] 2020 року, глобальний ринок цифрових двійників мав вирости з 3,8 млрд \$ до 35,8 млрд \$ до 2025 року із середньорічним темпом зростання 45,4 %, що підтверджує стратегічну важливість цієї технології для промисловості. Систематичне дослідження 167 публікацій [7] показало, що застосування цифрових двійників для прогностичного обслуговування та управління станом (Prognosis Health Monitoring) зросло експоненційно з 2018 року.

Якість та точність передбачення поведінки пристрою за допомогою цифрового двійника залежить виключно від точності вбудованої моделі, яка повинна максимально враховувати топологію, значення номіналів електричних елементів, а також їх паразитних параметрів. Варто відзначити, що паразитні параметри компонентів DC-DC перетворювачів, такі як еквівалентний послідовний опір (ESR) конденсаторів, опір обмотки індуктивності, паразитна індуктивність провідників, затримки перемикання транзисторів та параметри діодів – суттєво впливають на точність моделювання динамічної поведінки перетворювачів та застосування цифрового двійника. Як зазначено в роботі [8], невраховані паразитні ефекти призводять до розходження між номінальними значеннями з документації та реальними параметрами на рівні 6-40 % для різних компонентів (наприклад, розбіжність у значеннях індуктивності складає близько 7 %, ємності малих конденсаторів – до 16 %, а опору обмотки індуктивності – до 40 %), що є неприйнятним для систем діагностики та раннього виявлення деградації компонентів. Таким чином, наукова, пов'язана з підвищенням точності ідентифікації параметрів моделей силових перетворювачів є надзвичайно актуальною, оскільки дозволяє створювати високоточні математичні та/або програмні моделі, здатні відстежувати деградацію компонентів у реальному часі у складі цифрових двійників.

**Постановка проблеми.** Центральною проблемою при створенні високоточних моделей (в тому числі цифрових двійників) перетворювачів постійної напруги є невизначеність паразитних параметрів компонентів. На відміну від номінальних значень індуктивності, ємності компонентів, які точно наводяться в документації від виробників, модель перетворювача може бути уточнена (наближена до реального пристрою) шляхом врахування додаткових параметрів, таких як опір обмотки для дроселів та трансформаторів (winding resistance), еквівалентного послідовного опору конденсаторів (ESR), опору відкритого каналу MOSFET транзисторів ( $R_{on}$ ), падіння напруги на постійної прямої напруги діода, а також його опору у відкритому стані ( $VD$  та  $RD$ ), а також енергії, що зберігається в паразитних ємностях та індуктивностях напівпровідникових приладів. Ці параметри мають складні залежності від умов експлуатації, для прикладу, опір відкритого каналу транзистора має позитивний температурний коефіцієнт, питомий опір міді збільшується з  $1,724 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}$  при кімнатній температурі всього до  $2,3 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega \cdot \text{см}$  при  $100^\circ \text{C}$ , а заряд зворотного відновлення діода (reverse recovery charge,  $Q_{rr}$ ) залежить від прямого струму в відкритому стані та швидкості зміни струму під час вимикання діода. Інші параметри можуть варіюватися в широких межах, наприклад, падіння напруги на відкритому каналі IGBT транзистора становить від 2 до 4 В [9].

Для уточнення параметрів моделей перетворювачів можуть використовуватися традиційні підходи, однак вони мають суттєві обмеження. Ручне налаштування параметрів методом проб та помилок є надзвичайно трудомістким і неефективним для багатопараметричної задачі з великою кількістю невідомих параметрів. Навіть при використанні систематичних підходів, таких як покрокова зміна (parametric sweep) для ідентифікації ESR та ємності вихідного конденсатора, цей процес вимагає множинних ітерацій з розрахунком помилки на кожному кроці [8], при цьому немає гарантії знаходження глобального оптимуму для всього набору параметрів.

Вимірювальні методи ідентифікації паразитних параметрів, хоча й забезпечують високу точність для окремих компонентів, потребують спеціалізованого обладнання (RLC-метри, імпедансні аналізатори) та демонтажу компонентів з плати, що унеможливорює

онлайн-діагностику працюючої системи. Методи «білої скриньки» (white-box), запропоновані в роботі [8], дозволяють ідентифікувати параметри за усталеними та перехідними характеристиками, однак потребують значної апіорної інформації про структуру системи та чутливі до шумів вимірювань.

Багатопараметрична оптимізація паразитних параметрів є складною задачею через кілька факторів. По-перше, простір пошуку має високу розмірність, оскільки типова модель перетворювача постійного струму включає 5-10 паразитних параметрів. По-друге, цільова функція (мінімізація відхилення між моделлю та вимірюваннями) може мати множину локальних мінімумів через нелінійні взаємодії параметрів. По-третє, деякі параметри корельовані: наприклад, ESR та ємність конденсатора спільно визначають пульсації вихідної напруги [10], що створює вироджені напрямки в просторі оптимізації. У дослідженні [11] показано, що алгоритми, що базуються на методі рою часток (particle swarm optimization, PSO) досягають глобального оптимуму лише у 65 % випадків при оптимізації параметрів цифрового двійника перетворювача постійного струму, що знижує напругу, що підкреслює необхідність дослідження альтернативних підходів.

Варто відзначити, що більшість існуючих підходів до параметричної оптимізації цифрових двійників таких перетворювачів переважно базуються на згаданому вище методі рою частинок (PSO). Автори роботи [12] застосували PSO для оцінки параметрів перетворювача, що знижує напругу в рамках концепції цифрового двійника, включаючи паразитний опір конденсатора  $R_C$  та опір відкритого каналу MOSFET  $R_{DSon}$ , використовуючи кластерний аналіз даних для моніторингу деградації компонентів при різних умовах експлуатації.

Важливим є питання автоматизованої оптимізації параметрів для цифрових двійників, призначених для діагностики обладнання. На відміну від задач проектування, де достатньо наближеної відповідності моделі та реальної системи, діагностичні застосування вимагають вищої точності відтворення сигналів для виявлення ранніх ознак деградації компонентів [13]. Автори роботи [14] відзначили, що похибка калібрування цифрового двійника перетворювача, що підвищує напругу понад 2% призводить до неможливості достовірного моніторингу стану електrolітичних конденсаторів.

Генетичні алгоритми (ГА) пропонують альтернативний підхід з кращими властивостями глобального пошуку завдяки механізмам кросовера та мутації, які забезпечують ефективне дослідження багатомодального простору рішень. Порівняльні дослідження [15] показали, що ГА забезпечує на 24,15 % краще зниження перерегулювання та на 99% краще скорочення часу перехідного процесу порівняно з PSO при налаштуванні контролерів силових перетворювачів. Попри ці переваги, застосування ГА саме для оптимізації паразитних параметрів цифрових двійників перетворювачів постійного струму, що підвищують чи знижують напругу з метою їх діагностики залишається практично недослідженим, що обумовлює необхідність даного дослідження.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

**Генетичні алгоритми для оптимізації моделей DC-DC перетворювачів.** Застосування генетичних алгоритмів у силовій електроніці охоплює широкий спектр задач оптимізації. Найбільш розповсюдженим напрямком є налаштування параметрів PID-регуляторів для перетворювачів постійного струму. У роботі [16] автори розробили ГА-оптимізовані PID-контролери для перетворювачів, що знижують напругу, порівнюючи чотири критерії якості: IAE (інтеграл абсолютної похибки), ITAE (інтеграл зваженої за часом абсолютної похибки), ISE (інтеграл квадратичної похибки) та ITSE (інтеграл зваженої за часом квадратичної похибки). Найкращі результати отримано з критерієм IAE: перерегулювання 4,17 %, час наростання 0,0000504 с та час встановлення 0,000538 с, що суттєво перевищує показники традиційних методів налаштування [16].

Для buck-boost перетворювачів генетична оптимізація PID-контролерів досліджена в роботі [17], де автори проаналізували як усталені, так і перехідні режими роботи з мінімізацією IAE як цільової функції. Gill та співавтори [18] застосували ГА для оптимізації

надійності та питомої потужності 5 кВт синхронних перетворювачів, що підвищують напругу, використовуючи багатокритеріальний підхід з побудовою Парето-фронту для аналізу компромісів між середнім часом напрацювання на відмову (Mean Time Between Failures, MTBF) та об'ємною щільністю потужності.

Параметричний дизайн компонентів перетворювачів також є активним напрямком досліджень. У роботі [19] представлено ГА підхід заснований на методах штучного інтелекту щодо проектування синхронного перетворювача, що знижує напругу, що дозволив досягти ефективності 99,383 % (порівняно з 99,354 % для традиційного проектування), зниження пульсацій напруги до 0,168 % та зменшення об'єму на 26 % (з 7,716 см<sup>3</sup> до 5,732 см<sup>3</sup>).

Для ідентифікації параметрів перетворювачів важливим є дослідження [8], у якому автори запропонували метод «білої скриньки» на основі дискретизованих диференціальних рівнянь. Цей підхід дозволив ідентифікувати параметри  $L$ ,  $R_L$ ,  $C$ ,  $R_C$  та  $R_S$  як для перетворювачів, що знижують, так і підвищують напругу, використовуючи комбінацію усталених та перехідних режимів роботи. Хоча це дослідження не використовувало безпосередньо ГА, воно заклало методологічну основу для формування цільової функції багатопараметричної оптимізації.

#### ***Методи ідентифікації паразитних параметрів у силовій електроніці.***

Оцінювання ESR конденсаторів є найбільш дослідженим напрямком через критичну роль цього параметра у прогнозуванні відмов електролітичних конденсаторів. В роботі [20] запропоновано онлайн метод оцінювання ESR вихідного конденсатора перетворювача, що підвищує напругу на основі аналізу пульсацій напруги з використанням вейвлет-перетворення для фільтрації шумів. Автори роботи [21] розширили цей підхід застосуванням стисненого зондування (compressed sensing) для зниження вимог до частоти дискретизації АЦП при збереженні точності оцінювання.

У [22] представлено два методи оцінювання ESR конденсаторів перетворювача, що знижує напругу, з похибкою 2-12 % в експериментальних умовах (або близько 1 % в ідеальних симуляційних умовах), придатні як для режиму безперервних струмів (CCM), так і для режиму переривчастих струмів (DCM).

Ідентифікація опору обмотки індуктивності (DCR – DC Resistance) та параметрів напівпровідникових ключових елементів є менш дослідженою областю. В роботі [23] запропоновано метод комутованого опору для одночасного оцінювання DCR індуктора,  $R_{DSon}$  транзистора та прямого падіння напруги діода, що може бути інтегровано із замкненим контуром керування. Робота [24] розвинула підхід онлайн моніторингу індуктивності перетворювача, що знижує напругу, без використання датчика струму, компенсуючи вплив ESR на точність оцінювання.

Для SiC MOSFET ключів було представлено неінвазивний метод оцінювання  $R_{DSon}$  з точністю  $\pm 5$  % без вимірювання струму навантаження, що є важливим для раннього виявлення деградації напівпровідників [25]. У роботі [26] запропонували метод на три кроки для ідентифікації паразитних параметрів височастотного планарного трансформатора в перетворювачах на основі подвійних активних мостів (Dual Active Bridge, DAB) для електромобілів, який поєднує математичне моделювання на основі дуальності магнітних і електричних кіл з алгоритмом рекурсивних найменших квадратів із фактором забування (FFRLS) для ідентифікації. Метод забезпечує точність, порівнянну з вимірюванням імпедансним аналізатором та FEA-моделюванням, але є економнішим і швидшим, особливо для височастотних застосувань, де флуктуації імпедансних характеристик ускладнюють визначення резонансних частот традиційними способами. Експериментальна верифікація на 4,4 кВт прототипі з робочою частотою 40 кГц підтвердила ефективність методу для врахування впливу паразитних ємностей, індуктивностей та опорів на характеристики перетворювача.

Комплексні методи ідентифікації множини параметрів використовують адаптивні фільтри Калмана та машинне навчання. Автори роботи [27] застосували нейронну мережу dendrite net для ідентифікації ємності, індуктивності та ESR при змінних входніх напругах. Physics-Informed Neural Network (PINN), представлена в [28], долає проблеми недостатньої робастності та потреби у великих обсягах навчальних даних (лише 360 зразків було використано для навчання) при оцінюванні параметрів силових перетворювачів, демонструючи стійкість до похибки дискретизації АЦП (12 біт), шуму та похибки синхронізації.

#### ***Метаевристичні алгоритми для оптимізації моделей перетворювачів.***

Порівняльний аналіз різних метаевристичних алгоритмів для перетворювачів постійного струму представлений у кількох дослідженнях. У роботі [29] порівняно PSO, ГА та Grey Wolf Optimizer (GWO) для налаштування PID контролера перетворювача, що підвищує напругу, та встановлено, що GWO досягає на 50,89 % нижчої помилки у порівнянні з PSO та на 44,7 % порівняно з ГА. Це пояснюється меншою кількістю конфігураційних параметрів GWO та кращою здатністю уникати локальних оптимумів.

У роботі [30] було застосовано PSO з Extended Phase Shift (EPS) модуляцією для мінімізації струмового навантаження DAB перетворювачів. Запропонований метод IDAB-DMC знизив струмове навантаження з 5,52 А (звичайний EPS) до 5.05 А, що на 8.5% краще за традиційні підходи. Експериментальна верифікація також показала зменшення струмового навантаження з 9,76 А до 7,92 А, підтвердивши ефективність методу.

Також було розроблено PSO-оптимізацію двонаправлених перетворювачів постійного струму для електромобілів, досягнувши зниження загальних втрат потужності до 16,64 Вт. Оптимізація параметрів включала геометрію тороїдального індуктора, коефіцієнт заповнення ( $d = 0,69$ ) та характеристики комутаційних елементів, що дозволило знизити загальні втрати до 16.64 Вт і досягнути ККД 93,05 % у порівнянні з 82 % до оптимізації [31].

#### ***Цифрові двійники перетворювачів з оптимізацією параметрів.***

Концепція цифрових двійників для моніторингу стану перетворювачів постійного струму активно розвивається в наш час. У 2019 році дослідники з Ольборгського університету в Данії представили комплексну реалізацію цифрового двійника для перетворювачів постійного струму, яка відрізнялася покращеною точністю моделювання. На відміну від існуючих методів моніторингу стану на основі вимірювальних схем, що потребували додаткового апаратного забезпечення для кожного компонента окремо, а також від попередніх підходів, які були засновані на моделях (model-based), що моделювали лише силову частину та потребували доступу до контролера, запропонований підхід реалізував неінвазивний метод без додаткових апаратних засобів. У роботі [12] у 2021 році було розвинуто цей підхід для оцінювання показників здоров'я (State of Health) конденсаторів та MOSFET, застосовуючи PSO для калібрування параметрів.

Ключовим дослідженням, що демонструє потенціал генетичних алгоритмів для цифрових двійників, є робота [32]. Автори розробили самовдосконалюваний цифровий двійник багатофазного перетворювача, що підвищує напругу на основі SiC транзисторів, застосовувачи як PSO, так і ГА для багатоцільової оптимізації показників здоров'я компонентів. Дослідження встановило, що ГА демонструє кращу швидкість збіжності порівняно з PSO: середній час виконання для ГА становив 21.3 с проти 28.1 с для PSO при експериментальній валідації на 75-кВт чотирифазному прототипі з 1000 ітераціями. Важливо, що ГА забезпечив порівнянну або вищу точність оцінювання для більшості параметрів, демонструючи нижче стандартне відхилення для індуктивності (3.8  $\mu\text{H}$  проти 4.2  $\mu\text{H}$ ) та опору індуктивності (3.2 m $\Omega$  проти 4.3 m $\Omega$ ), хоча й потребував більших обчислювальних ресурсів через зростання пам'яті з кожною ітерацією. Методологія включала розв'язання рівнянь простору станів методом Рунге-Кутта четвертого порядку та мінімізацію середньоквадратичної похибки між сигналами фізичної системи та цифрової моделі, досягаючи точності оцінювання до 98,6 % для ємності та 79,8 % для опору у ввімкненому стані.

У роботі [33] запропонували методологію моніторингу стану трифазних перетворювачів на основі концепції цифрового двійника, що не потребує додаткових апаратних схем чи калібрування сенсорів. Для оцінювання деградації параметрів вихідного LC фільтра автори використали послідовну комбінацію двох алгоритмів оптимізації: PSO для швидкого наближеного пошуку в дискретному просторі та ГА для точного уточнення рішення в околі знайдених PSO параметрів. Цифровий двійник був запущений у режимі реального часу на платформі межових обчислень (Xilinx Zynq-7000) паралельно з системою керування фізичним перетворювачем, що забезпечувало безперервний моніторинг індуктивності та ємностей з похибкою оцінювання нижче 2%. Експериментальна валідація на 100 кВА UPS системі з TNPC топологією підтвердила ефективність методу для виявлення одночасної деградації компонентів фільтра в різних режимах роботи (islanding та grid-connected).

У роботі [34] використано метод цифрового двійника для перетворювача, що підвищує напругу, з використанням реалізації цифрової комутаційної моделі на основі FPGA. Дискретизація математичної моделі виконана методом зворотного Ейлера з частотою вибірки 1 МГц, що забезпечило синхронне виконання фізичної системи та її цифрового двійника на одній керуючій платі. Для оцінювання параметрів компонентів (індуктивності  $L$ , ємності  $C$ , опорів  $R_{DSon}$ ,  $R_L$ ,  $R_C$ ) застосовано алгоритм PSO, який мінімізує цільову функцію на основі різниці між вимірними та змодельованими сигналами струму індуктивності та вихідної напруги. Експериментальна верифікація показала збіжність PSO за 90 ітерацій ( $\approx 8$  секунд), при цьому похибка оцінювання індуктивності та ємності відносно вимірювань імпедансним аналізатором не перевищила 1%, хоча для паразитних опорів  $R_L$  та  $R_C$  похибка сягала 11-19%.

Автори роботи [11] представили альтернативний підхід з використанням глибокої нейронної мережі (DNN) для побудови цифрового двійника перетворювача, що знижує напругу, який було оптимізовано алгоритмом Spider Monkey Optimization (SMO), який як було показано, досягає глобального оптимуму у 95% випадків порівняно з 65 % для PSO. Запропонований гібридний SMO+DNN підхід потребує також на 33 % менше ітерацій для збіжності та демонструє на 80 % менше порушень параметричних обмежень та підвищує точність прогнозування часу до відмови. Для валідації використовувався як емпіричний датасет з низькопотужного прототипу під прискореним термічним циклюванням (24-83 °C), так і синтетичний датасет на 10 000 зразків. SMO-оптимізований профіль деградації (траєкторія зміни параметрів в часі) покращує характеристики перетворювача, зменшуючи пульсації вихідної напруги на 20-25 % та пульсації струму індуктивності на 15-20 % порівняно з PSO-оптимізацією.

У роботі [35] було розроблено імовірнісний цифровий двійник на основі Polynomial Chaos Expansion для діагностики силових перетворювачів. Підхід передбачає впровадження real-time стохастичних моделей безпосередньо у FPGA-контролері силових перетворювачів з можливістю виконання симуляцій з кроками інтегрування від 70 нс до 2 мкс залежно від топології та платформи. Автори запропонували розділення моделей за ієрархією управління (application та converter layers), що значно знижує обчислювальну складність порівняно з монолітними моделями. Тестування на платформі Hardware-in-the-Loop продемонструвало здатність системи виявляти відхилення параметрів компонентів за межі проєктних допусків, дисбаланс розподілу потужності між паралельними модулями та спотворені значення в каналах вимірювання струму в реальному часі. Результати показали можливість реалізації ймовірнісних цифрових двійників для підвищуючої та напівмостової топологій перетворювачів на сучасних FPGA платформах Xilinx Kintex-7 та Virtex Ultrascale Plus.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз літератури виявив, що генетичні алгоритми широко використовуються для оптимізації дизайну перетворювачів постійного струму, зокрема для вибору номінальних значень пасивних компонентів



та параметрів контролерів. Однак для ідентифікації паразитних параметрів існуючих систем переважно застосовують інші методи: PSO [12; 14; 32; 34], аналітичні підходи [8], або нейронні мережі. Лише декілька робіт застосовують генетичні алгоритми, причому виключно у комбінації з PSO [32; 33], а не як самостійний метод. Роботи, що використовують ГА як основний метод для ідентифікації паразитних параметрів моделей перетворювачів на основі експериментальних вимірювань, у відомій літературі відсутні. Водночас у роботі [32] експериментально підтверджено, що генетичні алгоритми демонструють кращу швидкість збіжності для певних класів оптимізаційних задач, що свідчить про потенціал подальшого дослідження підходів, що базуються на ГА. Запропоноване дослідження заповнює цю прогалину, отримані результати можуть бути використані для оптимізації моделі, у тому числі і для застосування її у складі цифрового двійника перетворювачів напруги постійного струму.

Існуючі методи ідентифікації паразитних параметрів зазвичай фокусуються на окремих елементах (переважно ESR конденсаторів [20; 21; 22]) та не розглядають задачу комплексної одночасної оптимізації множини параметрів (ESR, DCR, паразитні індуктивності, характеристики ключів та діодів) з метою мінімізації похибки цифрового двійника. Методи «білої скриньки» [8] забезпечують теоретичну основу для формулювання задачі, проте потребують ефективних алгоритмів глобальної оптимізації для практичної реалізації.

Порівняльні дослідження ГА та PSO для інших задач силових електроніки демонструють суперечливі результати щодо переваг кожного алгоритму. В роботі [29] показано кращу продуктивність PSO над ГА для налаштування PID-контролерів перетворювачів напруги. Водночас результати роботи [15] показують протилежний результат – ГА перевершив PSO за всіма метриками при оптимізації ковзного режиму керування. У комплексному порівнянні 28 алгоритмів [36] встановлено, що жоден метод не є універсально оптимальним. Ці суперечності свідчать про необхідність дослідження застосування ГА саме для багатопараметричної оптимізації паразитних параметрів у цифрових двійниках.

Не висвітленою залишається також методологія застосування ГА для ітеративного вдосконалення точності цифрового двійника на основі порівняння з реальними вимірюваннями. Існуючі роботи використовують оптимізацію переважно для початкового калібрування моделі, тоді як концепція самовдосконалюваного цифрового двійника з безперервною адаптацією параметрів потребує подальшого розвитку. Крім цього, також відсутні дослідження специфічних переваг та обмежень ГА порівняно з альтернативними алгоритмами (PSO, GWO, SMO) саме для задачі оптимізації паразитних параметрів моделей з метою діагностики обладнання.

**Мета статті.** Ключова новизна запропонованого дослідження полягає у розробці методології оптимізації паразитних параметрів математичних моделей перетворювачів постійного струму (що знижують та підвищують напругу) за допомогою генетичного алгоритму для підвищення точності цифрових двійників, що використовуються для діагностики апаратного забезпечення. Дослідження охоплює комплексну оптимізацію 7 параметрів (ESR конденсатора, паразитна індуктивність, опір обмотки індуктивності, затримки транзисторів, характеристики діода) на основі реальних вимірювань з обладнання, що є унікальним поєднанням підходів, не представленим у відомих публікаціях.

Практична значущість дослідження обумовлена необхідністю створення точного цифрового двійника для системи дистанційної лабораторії по роботі з апаратним забезпеченням (а саме перетворювача, що знижує напругу), що був розроблений в рамках проєкту Lab Discovery Engine (міжнаціональний субгрант проєкту NGI Search від програми Horizon Europe HORIZON-CL4-2021-HUMAN-01) без необхідності інвазивних вимірювань або виведення обладнання з експлуатації. Розроблена методологія може бути застосована для раннього виявлення деградації компонентів, прогнозованого технічного обслуговування та підвищення надійності критичних систем силових електроніки.

Результати даної роботи будуть надалі використані для впровадження цифрового двійника для методології діагностики апаратного забезпечення, яка була представлена у роботі [37].

**Виклад основного матеріалу.** Перетворювач постійного струму, що знижує напругу, який аналізувався в даній роботі, показано на рис. 1. Зображена схема є ідеальною, та ігнорує паразитні параметри, які мають свій вплив на залежність вихідних значень схеми від вхідних. Наявність паразитних параметрів в моделі дозволяє наблизити поведінку моделі до поведінки реального апаратного забезпечення. Під час попередніх експериментів з даною моделлю та порівняння її з експериментальним макетом перетворювача було виявлено, що така модель у PySpice (Ngspice) недостатньо точно відображає поведінку реального обладнання. Ця розбіжність між моделлю і реальним пристроєм призводить до суттєвого зниження точності цифрового двійника. Отже, для кращих результатів модель має включати в себе паразитні параметри, наприклад такі, як: опір котушки індуктивності (DCR)  $R_L$ , еквівалентний послідовний опір конденсатора (ESR)  $R_C$ , паразитна індуктивність конденсатора  $L_C$  тощо (рис. 2). Також слід враховувати неідеальність поведінки електронних компонентів, наприклад затримки на перемикання транзистора. Основні параметри експериментального макета перетворювача, а також початкові значення паразитних параметрів, що приймалися на початку дослідження, наведено в табл. 1.

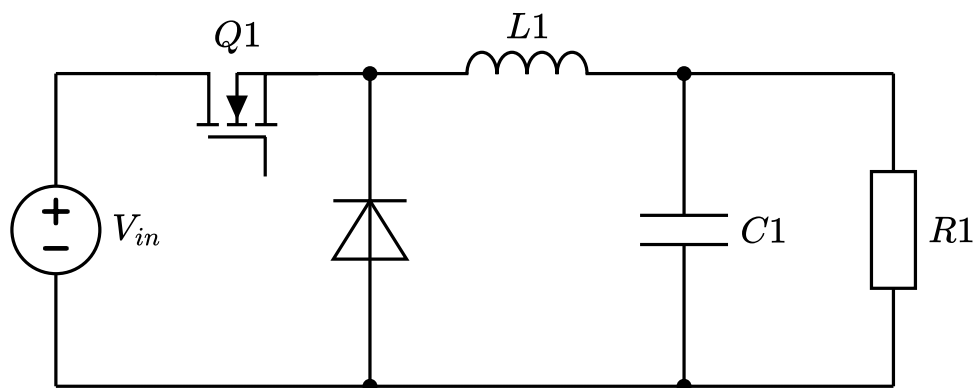


Рис. 1. Типова схема понижувального перетворювача напруги  
Джерело: розроблено авторами.

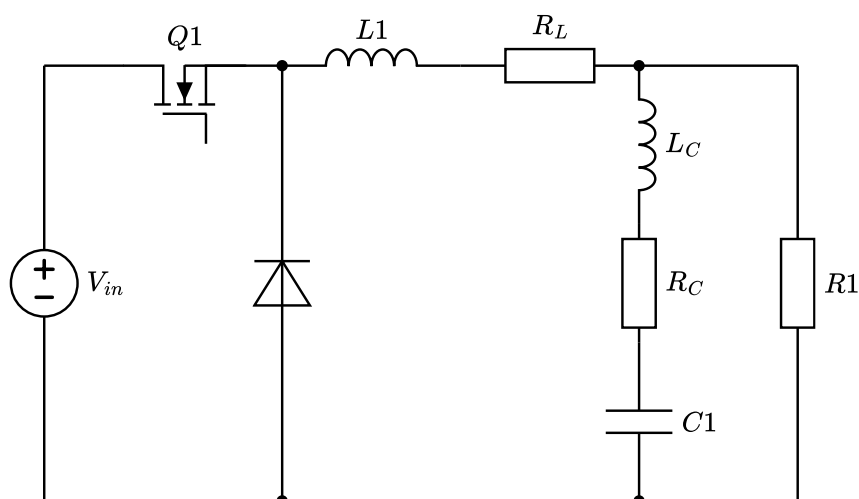


Рис. 2. Розширена схема електрична принципова перетворювача  
з деякими паразитними елементами

Джерело: розроблено авторами.

*Таблиця 1 – Параметри експериментального перетворювача постійного струму, що знижує напругу та початкові значення паразитних параметрів*

| Параметр                                                  | Позначення | Початкове значення |
|-----------------------------------------------------------|------------|--------------------|
| Вхідна напруга, В                                         | $V_{in}$   | 12                 |
| Частота сигналу ШІМ, кГц                                  | $f_{PWM}$  | 312.5              |
| Шпаруватість ШІМ                                          | $D$        | 0.5                |
| Індуктивність котушки, мкГн                               | $L$        | 10                 |
| Ємність конденсатора, мкФ                                 | $C$        | 44                 |
| Опір навантаження, Ом                                     | $R_l$      | 3.8                |
| Еквівалентний послідовний опір конденсатора, Ом           | $R_C$      | 0.02               |
| Еквівалентний послідовний опір котушки індуктивності, мОм | $R_L$      | 19.5               |
| Опір діода, Ом                                            | $R_D$      | 0.05               |
| Опір стік-витік відкритого транзистора, Ом                | $R_{DSon}$ | 1e-9               |
| Вхідна напруга, В                                         | $V_{in}$   | 12                 |

Джерело: розроблено авторами

Загалом, методика оптимізації паразитних параметрів, яку було використано в роботі, складається з наступних етапів:

1. Збір експериментальних даних.
2. Попередня обробка даних: фільтрація шумів та статистичний аналіз отриманих вимірювань для визначення діапазонів ключових показників (середні значення та пульсації напруги та струму).
3. Ідентифікація цільового сигналу: визначення вимірювання, яке є рівновіддаленим (наскільки це можливо) від екстремальних значень показників. Цей сигнал слугуватиме еталоном для оптимізації.
4. Оптимізація генетичним алгоритмом.
5. Перевірка оптимізованої моделі.

#### **Початковий збір даних.**

Методика початкового збору даних полягала у наступному. На експериментальному макеті перетворювача (параметри елементів та режим роботи наведено у таблиці 1), за допомогою цифрового осцилографа, протягом 4 годин з періодом 2 секунди робилися вибірки даних – напруги на ємності  $C1$  ( $V_C$ ) та напруга на виході перетворювача струм-напруга для вимірювання струму індуктивності  $L1$  ( $I_L$ ). Дані вибірки зберігалися на сервері для забезпечення до них доступу скриптами обробки. Загалом вибірка налічувала 6705 пар даних.

#### **Попередня обробка даних.**

На основі цих даних за допомогою мови програмування Python виконувався початковий аналіз поведінки схеми, а саме – пошук середніх значень напруги та струму, пульсацій напруги та струму, статистичні значення щодо діапазонів цих параметрів (наприклад значення найбільшої і найменшої пульсації напруги). Результати цього аналізу також будуть використані для визначення параметра  $\theta$  для реалізації методології, що описана в [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Приклад сигналів, які були обрані випадковим чином серед усього набору даних, зображено на рис. 3, де показані два періоди сигналів керування силовим транзистором. З рис. 3 видно, що сигнали мають значний шум (що пов'язано з реалізацією перетворювача, який використовується для проведення лабораторних робіт), а також в момент комутації струм має помітні викиди, що пов'язані зі значною паразитною індуктивністю контуру перемикання струму.

Оскільки показниками, які будуть використовуватися як вихідний вектор для методології, що описана в [37] є середня напруга на виході (вихідному конденсаторі фільтра)  $V_{Cavg}$ , пульсації напруги на виході (вихідному конденсаторі фільтра)  $V_{Cripple}$ , середній

струм через індуктивність  $I_{Lavg}$ , та пульсації струму через індуктивність  $I_{Lripple}$ , то доцільно проаналізувати діапазон значень цих показників. Вибірки, відсортовані по рівню від найменшого до найбільшого, показані на рис. 4.

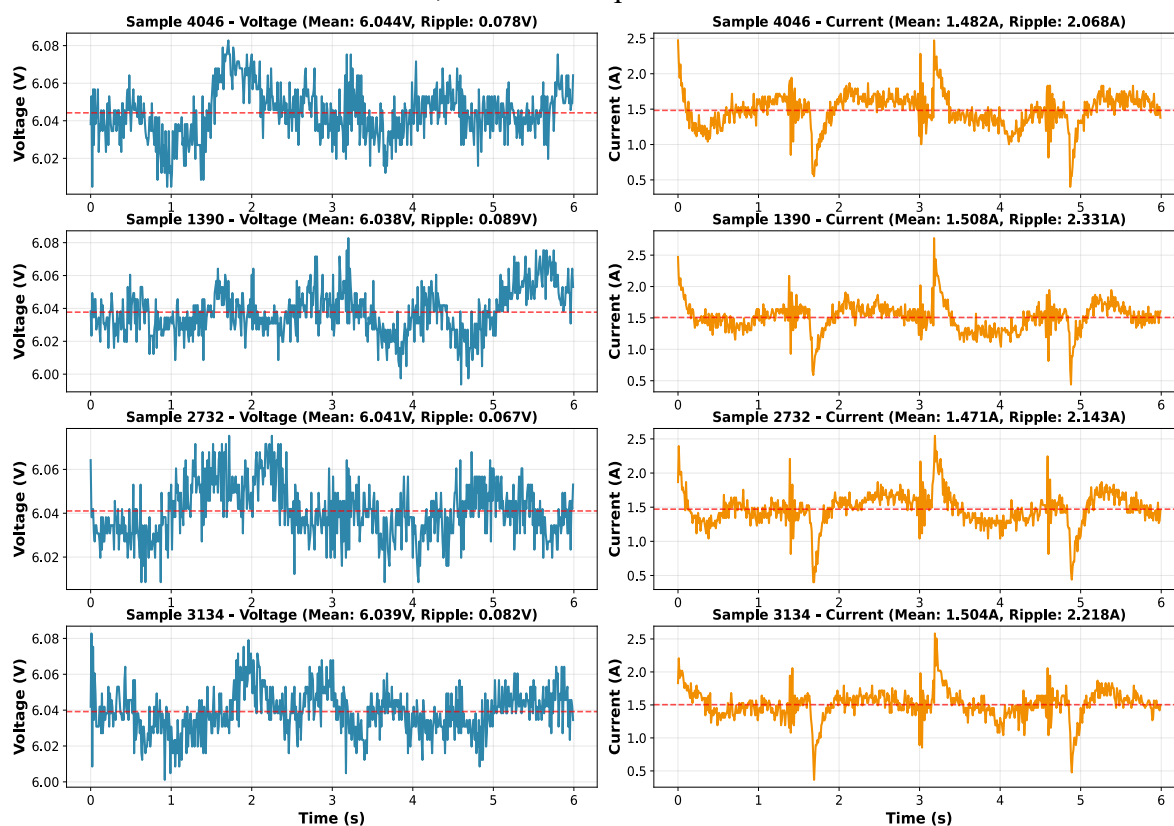


Рис. 3. Приклад сигналів з вибірки – напруга  $V_C$  та струм  $I_L$

Джерело: розроблено авторами.

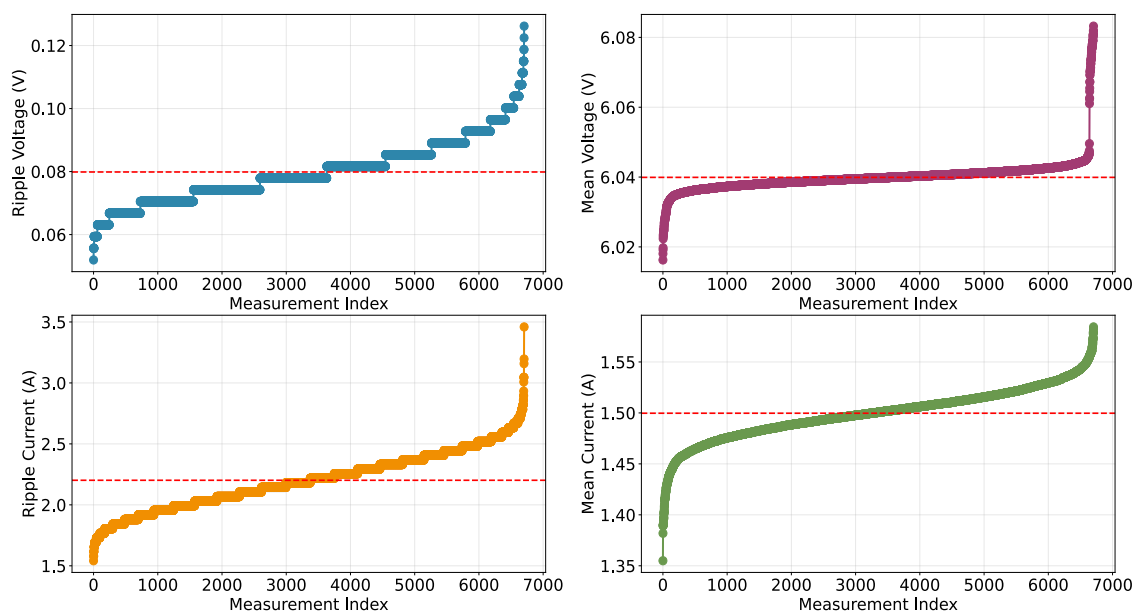


Рис. 4. Графічне зображення діапазонів чотирьох показників  $V_{Cripple}$ ,  $V_{Cavg}$ ,  $I_{Lripple}$ ,  $I_{Lavg}$  у наявній вибірці сигналів

Джерело: розроблено авторами.

Статистика з отриманими значеннями вибірок відображена в табл. 2.

Таблиця 2 – Статистичні дані чотирьох показників

| Показник                             | Мінімум | Максимум | Середнє | Медіана | Різниця макс.-мін., абс. | Різниця макс.-мін., % |
|--------------------------------------|---------|----------|---------|---------|--------------------------|-----------------------|
| Пульсації на-<br>пруги $V_{Cripple}$ | 0,052 В | 0,126 В  | 0,080 В | 0,079 В | 0,074 В                  | 142,86                |
| Середня на-<br>пруга $V_{Cavg}$      | 6,016 В | 6,083 В  | 6,040 В | 6,040 В | 0,067 В                  | 1,11                  |
| Пульсації<br>струму $I_{Lripple}$    | 1,542 А | 3,459 А  | 2,202 А | 2,181 А | 1,917 А                  | 124,39                |
| Середній<br>струм $I_{Lavg}$         | 1,355 А | 1,584 А  | 1,500 А | 1,501 А | 0,229 А                  | 16,93                 |

Джерело: розроблено авторами.

Статистичний аналіз наявних сигналів демонструє розподіл, за формою близький до нормального. Графік розподілу, а також коробковий графік зображено на рис. 5, а в табл. 3 зображено дані щодо розподілу в числовому вигляді.

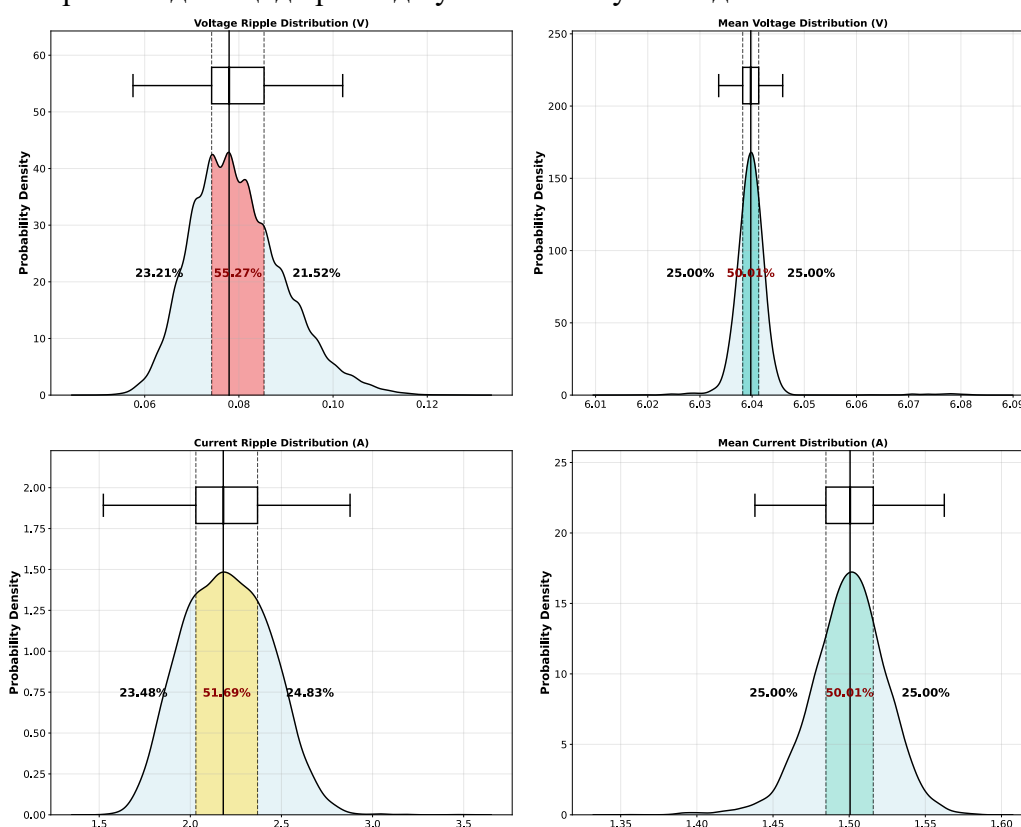


Рис. 5. Графічне зображення розподілу значень чотирьох показників  $V_{Cripple}$ ,  $V_{Cavg}$ ,  $I_{Lripple}$ ,  $I_{Lavg}$  у наявній вибірці сигналів

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 3 – Дані розподілу чотирьох показників

| Показник                        | Q1      | Q3      | IQR     | Відсоток відліків в межах IQR, % | Відсоток відліків менших за Q1, % | Відсоток відліків більших за Q3, % |
|---------------------------------|---------|---------|---------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Пульсації напруги $V_{Cripple}$ | 0,074 В | 0,085 В | 0,011 В | 55,27                            | 23,21                             | 21,52                              |
| Середня напруга $V_{Cavg}$      | 6,038 В | 6,041 В | 0,003 В | 50,01                            | 25,00                             | 25,00                              |
| Пульсації струму $I_{Lripple}$  | 2,030 А | 2,369 А | 0,338 А | 51,69                            | 23,48                             | 24,83                              |
| Середній струм $I_{Lavg}$       | 1,484 А | 1,516 А | 0,031 А | 50,01                            | 25,00                             | 25,00                              |

Джерело: розроблено авторами.

Як можна бачити з наведених вище таблиці, співвідношення між мінімальним і максимальним значеннями пульсацій напруги та пульсацій струму є досить високими (вище за 100 %), що обумовлено високим рівнем шумів та зазначеними вище проблемами зі схемою вимірювання. Дані умови є чудовими для тестування описаної в [37] методології, оскільки дозволяють перевірити коректність її роботи на обладнанні, яке використовується в лабораторних роботах, так є неідеальним. Оскільки методологія працює з пороговим значенням  $\theta$ , яке саме по собі є відносною величиною, то зниження співвідношення розбіжностей максимального і максимального значення показників є важливим для забезпечення більшої точності й надійності роботи алгоритму.

З таблиці 2 також видно, що пульсації струму, при великій відсотковій різниці між максимальним та мінімальним значеннями, мають велике медіанне значення (2.181 А), що призводить до високої абсолютної різниці між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму:  $\sim 1,917$  А. Оскільки основною з проблем є висока зашумленість сигналів, то доцільним є накладання фільтра, такого як фільтр ковзного середнього. Експериментальним шляхом було визначено ширину вікна фільтра струму в 17 відліків. З таблиці 2 видно, що хоча пульсації напруги й мають велику розбіжність, у порівнянні зі значеннями середньої напруги вони є досить малими, що призвело до рішення фільтрувати тільки сигнали струму  $I_L$ , а не напруги  $V_C$ .

На рис. 6 зображено відсортовані значення чотирьох показників, які були отримані після накладання описаного вище фільтра на всі сигнали з набору даних. Візуально можна бачити, що діапазон значень був змінений. Числові значення наведені в табл. 3. З порівняння таблиць видно, що значення пульсацій напруги та середньої напруги не змінилися, що є очевидним, оскільки фільтрація не була використана до сигналів напруг. Помітно, що відсоткова різниця між максимальним і мінімальним значеннями пульсацій струму виросла з 124,39 до 150 %, але водночас абсолютна різниця між максимумом та мінімумом знизилася з 1,918 до 0,677 А, що дорівнює зниженню приблизно у 2,83 раза. Таке суттєве зниження розкиду пульсацій свідчить про вдалий результат фільтрації, що матиме позитивний вплив на результати роботи методології.

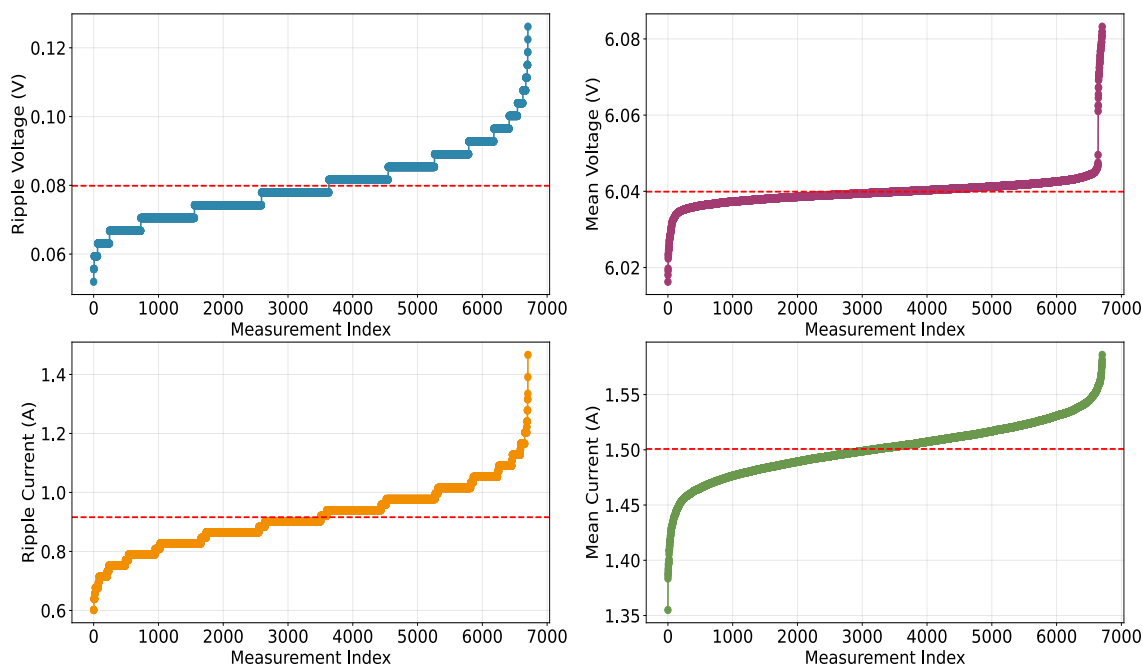


Рис. 5. Графічне зображення діапазонів чотирьох показників  $V_{Cripple}$ ,  $V_{Cavg}$ ,  $I_{Lripple}$ ,  $I_{Lavg}$  у наявній вибірці сигналів після фільтрації струму

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 – Статистичні дані чотирьох показників після фільтрації

| Показник                        | Мінімум  | Максимум | Середнє значення | Медіана | Різниця максимум-мінімум | Відсоткова різниця максимум-мінімум, % |
|---------------------------------|----------|----------|------------------|---------|--------------------------|----------------------------------------|
| Пульсації напруги $V_{Cripple}$ | 0,0519 В | 0,126 В  | 0,080 В          | 0,078 В | 0,074 А                  | 142,86                                 |
| Середня напруга $V_{Cavg}$      | 6,016 В  | 6,083 В  | 6,040 В          | 6,040 В | 0,067 В                  | 1,11                                   |
| Пульсації струму $I_{Lripple}$  | 0,451 А  | 1,128 А  | 0,722 А          | 0,714 А | 0,677 А                  | 150,00                                 |
| Середній струм $I_{Lavg}$       | 1,350 А  | 1,585 А  | 1,500 А          | 1,501 А | 0,235 А                  | 17,43                                  |

Джерело: розроблено авторами.

**Оптимізація моделі та визначення  $\theta$ .** Дана реалізація методології базується на порівнянні реальних сигналів з програмною моделлю. Хоча деякі з параметрів моделі відомі (наприклад, опір навантаження, індуктивність дроселя і так далі), інші залишаються невідомими, бо залежать не від підібраних компонентів, а є паразитними параметрами, що залежать як від монтажу плати, так і від паразитних параметрів самих елементів. Наприклад, одним з таких параметрів є паразитна індуктивність конденсатора.

Постає необхідність дати формальне визначення тому, що являється оптимальною моделлю для подальшого виконання самої оптимізації. Оскільки задля спрощення роботи з методологією, як описано в [37] варто визначати однакове значення  $\theta$ , як для позитивних відхилень поведінки реального пристрою від математичної моделі, так і для негативних відхилень, то ідеально оптимізована модель має давати значення, що знаходяться “по середині”, іншими словами потрібно, щоб різниця по кожному з чотирьох показників (середня напруга, пульсація напруги, середній струм, пульсація струму) між максимальним значенням і значенням моделі приблизно дорівнювала різниці між значенням моделі й мінімальним значенням. Таким чином, модель буде знаходитися “по центру” всього можливого діапазону значень, а отже спільне значення для позитивних і негативних відхилень  $\theta$  може бути використане.

Важливо зазначити, що шуми мають випадковий характер, неможливо гарантовано визначити точне порогове значення  $\theta$ , оскільки навіть при досить тривалому зборі даних нема гарантії, що пізніше не виникне такий шум, що перевищить це порогове значення. Через цю проблему доцільно або збільшити значення  $\theta$  на певний відсоток (взяти запас), або запускати алгоритм більш ніж один раз. Детальніше про це буде сказано далі.

З рис. 6 можна бачити, що розподіл значень показників не є рівномірним, тому задля знаходження “центрального” вимірювання, по якому буде оптимізуватися модель, доцільно використати формулу розрахунку «midpoint» (середини відрізка) по відфільтрованих значеннях, а саме:

$$X_{midpoint} = \frac{x_{min} + x_{max}}{2}, \quad (1)$$

де  $X$  – це один з чотирьох показників;

$x_{min}$  – це мінімальне значення показника;

$x_{max}$  – максимальне значення.

Таким чином, якщо припустити, що модель буде ідеально повторювати отриманий через розрахунок «midpoint», тоді її показники будуть рівновіддаленими від крайніх можливих значень кожного з показників, що і є оптимальною поведінкою моделі.

Для спрощення розрахунків пошук «midpoint» виконувався лише по двом з чотирьох показників: пульсаціям напруги та пульсаціям струму. Вибір саме цих двох показників пов'язаний з тим, що, як можна бачити з табл. 2, 3 та 4, ці показники мають набагато більшу дисперсію у порівнянні із середніми значеннями.

Кожному з вимірювань (семплів) рахується відстань від midpoint за формулою:

$$\text{dist}(X) = \left( \frac{X_i - X_{\text{midpoint}}}{\text{std}(X)} \right)^2, \quad (2)$$

де  $X_i$  - значення  $i$ -го сигналу (з набору даних);

$\text{std}(X)$  - стандартне відхилення серед усіх сигналів в наборі даних.

Формула використовує ділення на стандартне відхилення для нормалізації розрахунків, оскільки напруги і струми мають різні одиниці виміру. У результаті буде обрано набір сигналів (сигнал напруги і струму), який має найменшу відстань від «midpoint».

На рис. 7, а зображено наявні в наборі даних співвідношення пульсацій струму та напруги, а також виділено відповідне вимірювання, яке має мінімальну «відстань» (у цього випадку 0) до «midpoint», а на рис. 7, б – відсортовані значення відстаней.

Отже, отримана пара сигналів (напруги і струму) може бути використана як еталонна для оптимізації моделі. Для оптимізації використовуються різні параметри, як, наприклад, послідовний опір конденсатора, послідовний опір індуктивності тощо. Повний список буде наведено в таблиці далі. Оскільки перелік параметрів є досить великим, то виконувати оптимізацію шляхом повного перебору не є доцільним через занадто велику тривалість по часу такої оптимізації, саме тому для оптимізації було використано генетичний алгоритм. Цей алгоритм на кожній ітерації намагається наблизити вихідні значення моделі (середні значення та пульсації напруги та струму) до еталонної пари сигналів, що були отримані в попередньому кроці.

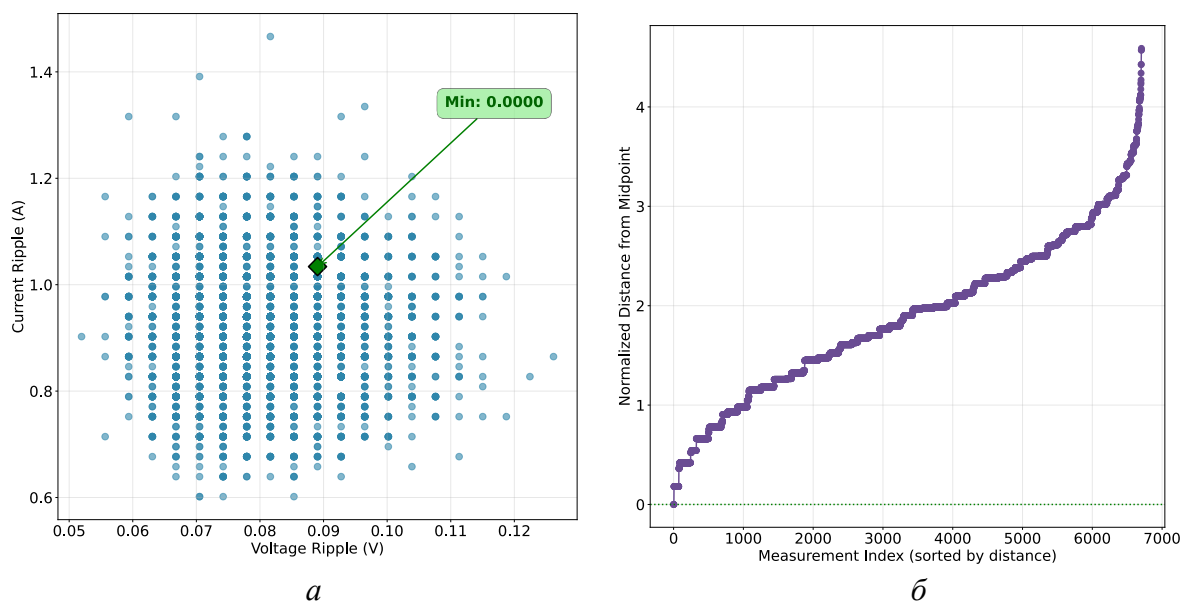


Рис. 6. Співвідношення між пульсаціями напруги і струму (а), нормалізовані відстані до midpoint (б)

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 5 містить перелік параметрів, які підбираються генетичним алгоритмом. Шість з семи параметрів кодуються в логарифмічній шкалі через великий діапазон значень (декілька порядків). Це забезпечує рівномірне дослідження параметрів у всьому діапазоні значень генетичним алгоритмом.



Таблиця 5 – Використані значення параметрів для оптимізації генетичним алгоритмом

| Параметр                                            | Початкове значення | Від     | До      | Шкала        |
|-----------------------------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------|
| Час наростання струму затвору транзистора, $t_{Gr}$ | 1 нс               | 0,1 нс  | 100 нс  | Логарифмічна |
| Час спаду струму затвору транзистора, $t_{Gf}$      | 1 нс               | 0,1 нс  | 100 нс  | Логарифмічна |
| Опір каналу транзистора, $R_{DSon}$                 | 1 нОм              | 1 пОм   | 1 мОм   | Логарифмічна |
| Опір діода $R_D$                                    | 100 мкОм           | 1 мкОм  | 0,1 Ом  | Логарифмічна |
| Струм насичення діода $I_S$                         | 1 mA               | 1e-16 A | 1e-10 A | Логарифмічна |
| Опір конденсатора, $R_C$                            | 0.05 Ом            | 1 мОм   | 0,5 Ом  | Лінійна      |
| Індуктивність конденсатора, $L_C$                   | 1 нГн              | 1 пГн   | 100 нГн | Логарифмічна |

Джерело: розроблено авторами.

Нормалізовані гени  $g \in [0,1]$  декодуються у фактичні значення параметрів за формулами:

**Логарифмічна шкала:**

$$value = 10^{\log_{10}(\min) + g * (\log_{10}(\max) - \log_{10}(\min))}. \quad (3)$$

**Лінійна шкала:**

$$value = \log(\min) + g * (\log(\max) - \log(\min)), \quad (4)$$

де  $value$  це кінцеве значення параметра,  $g$  – значення гена,  $\max$  – значення параметра «до» з табл. 5,  $\min$  – значення параметру «від» з табл. 5.

Функція пристосованості (fitness function) має такий вигляд:

$$fitness = w_{Vrip} * \Delta V_{rip}^2 + w_{Vavg} * \Delta V_{avg}^2 + w_{Irip} * \Delta I_{rip}^2 + w_{Iavg} * \Delta I_{avg}^2, \quad (5)$$

де відповідні  $w$  є ваговими коефіцієнтами.

Ця функція враховує квадрат різниці кожного показника реального сигналу (з фільтрацією для струму) з модельованим сигналом, помножений на відповідний ваговий коефіцієнт. Наявність квадрата «штрафує» однаковим чином як позитивне, так і негативне відхилення. Наявність ваг дозволяє коректувати алгоритм таким чином, щоб він більше акцентував увагу на конкретному параметрі. Аналогічно до вибору пульсацій як більш важливих значень для розрахунку «midpoint», як було зазначено вище, у цій функції пристосованості також більше приділяється уваги значенням пульсацій. Використані для оптимізації ваги мають наступні значення, сума яких дорівнює 1, як зазначено в табл. 6.

Таблиця 6 – Вагові коефіцієнти

| Параметр                        | Вага |
|---------------------------------|------|
| Середня напруга $V_{Cavg}$      | 0.35 |
| Пульсації напруги $V_{Cripple}$ | 0.3  |
| Середній струм $I_{Lavg}$       | 0.2  |
| Пульсації струму $I_{Lripple}$  | 0.15 |

Джерело: розроблено авторами.

Цей генетичний алгоритм був запущений для 100 поколінь з розміром покоління в 50 одиниць. Результати виконання алгоритму наведено в табл. 7, і є близькими до оптимальних значення невідомих параметрів моделі.

Таблиця 7 – Вагові коефіцієнти

| Параметр                                            | Початкове значення | Оптимізоване значення |
|-----------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Час наростання струму затвора транзистора, $t_{Gr}$ | 1 нс               | 0,1007 нс             |
| Час спаду струму затвора транзистора, $t_{Gf}$      | 1 нс               | 82,65 нс              |
| Опір каналу транзистора, $R_{DSon}$                 | 1 нОм              | 3,316 пОм             |
| Опір діода $R_D$                                    | 100 мкОм           | 1 мкОм                |
| Струм насичення діода $I_S$                         | 1 МА               | 2,423e-15 А           |
| Опір конденсатора, $R_C$                            | 0.05 Ом            | 0,0878 Ом             |
| Індуктивність конденсатора, $L_C$                   | 1 нГн              | 0,322 нГн             |

Джерело: розроблено авторами.

Для перевірки того, наскільки отримані генетичним алгоритмом значення насправді є оптимальними, треба визначити статистику щодо співвідношення значень сигналів програмної моделі (зі встановленими оптимізованими значеннями) з реальними сигналами. Це доцільно зробити на вже існуючих, зібраних на проміжку часу приблизно в 4 години, даних. На рис. 8 зображено графіки відхилень:

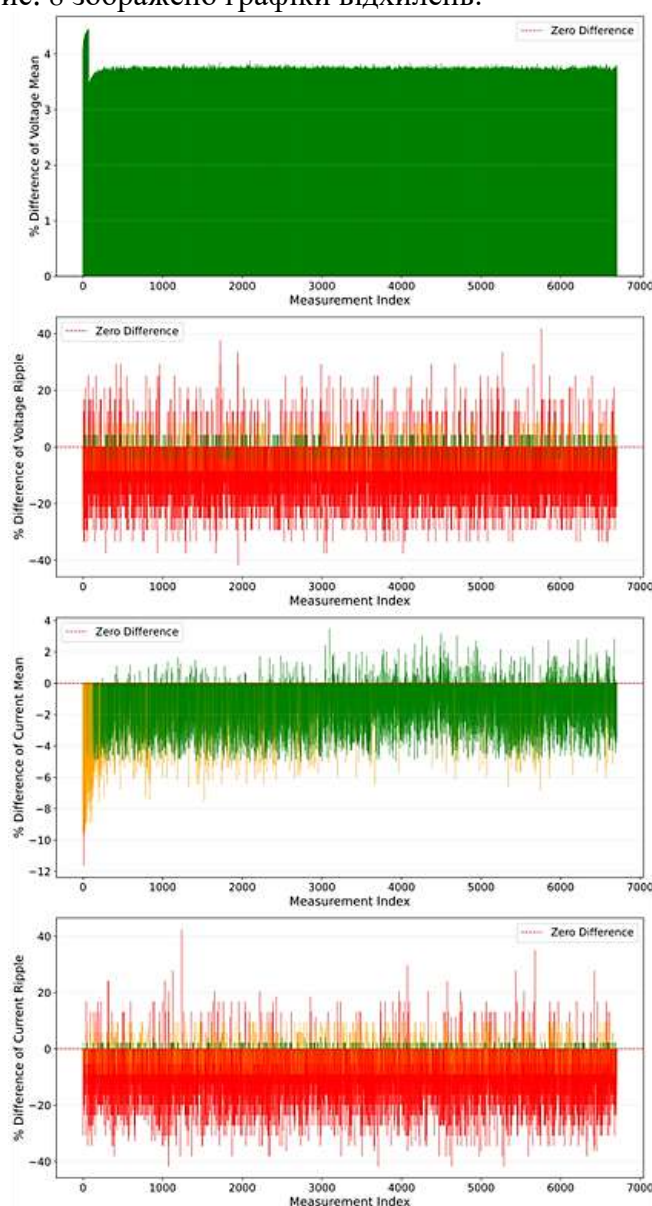


Рис. 7. Графіки відхилень поведінки оптимізованої моделі перетворювача від кожного з наявних у вибірці сигналів у відсотковому співвідношенні  
Джерело: розроблено авторами.

Статистичні дані щодо відхилень різних реальних сигналів від модельованого сигналу з використанням оптимізованих значень моделі наведено в таблиці 8.

Таблиця 8 – Вагові коефіцієнти

| Показник                        | Середнє відхилення, % | Медіана відхилення, % | Мінімальне відхилення, % | Максимальне відхилення, % |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| Середня напруга $V_{Cavg}$      | 3.71                  | 3.71                  | 3.3                      | 4.45                      |
| Пульсації напруги $V_{Cripple}$ | -10.3                 | -12.48                | -41.66                   | 41.69                     |
| Середній струм $I_{Lavg}$       | -2.12                 | -2.06                 | -11.63                   | 3.43                      |
| Пульсації струму $I_{Lripple}$  | -11.13                | -12.46                | -41.64                   | 42.25                     |

Джерело: розроблено авторами

З табл. 8 та рис. 8 видно, що оптимізація моделі для отримання midpoint'у по пульсаціям напруги та струму була виконана цілком успішно, оскільки мінімальні та максимальні відхилення цих показників є приблизно рівними: -41,66 % та 41,69 % для пульсацій напруги, а також -41,64 % та 42,25 % для пульсацій струму відповідно. Цей факт дозволяє з легкістю встановити значення  $\theta$  для кожного з чотирьох параметрів. Як значення обирається найбільше за модулем серед мінімального, так максимального відхилення.

**Висновки.** Застосування генетичного алгоритму для оптимізації паразитних параметрів математичної моделі перетворювача постійного струму, що знижує напругу, продемонструвало практичну ефективність підходу. Оптимізація семи параметрів (затримки транзистора, опори діода та транзистора у відкритому стані, струму насичення діода, ESR та паразитної індуктивності конденсатора) на основі 6705 експериментальних вимірювань дозволила досягти симетричних відхилень моделі від реальних сигналів:  $\pm 41,69$  % для пульсацій напруги та  $\pm 42,25$  % для пульсацій струму. Це забезпечує можливість встановлення єдиного порогового значення  $\theta$  для позитивних та негативних відхилень у методології діагностики апаратного забезпечення, запропонованій у роботі [37].

Розроблена методологія ідентифікації паразитних параметрів через пошук «midpoint» та використання багатокритеріальної функції пристосованості з ваговими коефіцієнтами (0,35 для середньої напруги, 0,3 для пульсацій напруги, 0,2 для середнього струму, 0,15 для пульсацій струму) дозволяє створювати високоточні цифрові двійники без інвазивних вимірювань або виведення обладнання з експлуатації. Застосування фільтрації ковзного середнього (вікно 17 відліків) знизило абсолютну різницю пульсацій струму у 2.83 рази, що суттєво покращує надійність діагностики.

Результати дослідження заповнюють прогалину у застосуванні генетичних алгоритмів для багатопараметричної оптимізації паразитних параметрів перетворювачів постійного струму, що раніше переважно виконувалось методами PSO. Розроблений підхід може бути розширений на топологію, що підвищує напругу та інші типи перетворювачів, а також інтегрований у системи прогностичного обслуговування для раннього виявлення деградації компонентів у критичних застосуваннях силової електроніки.

Впровадження точних цифрових двійників на основі запропонованої методології має потенціал суттєво знизити економічні втрати від незапланованих простоїв обладнання через забезпечення можливості моніторингу стану компонентів у реальному часі та перехід від реактивного до проактивного технічного обслуговування.

#### Список використаних джерел

1. Siemens AG. (2024). *The true cost of downtime 2024: Fortune Global 500 analysis* (Siemens/Senseye). Siemens AG.
2. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., & Tavner, P. (2011). An industry-based survey of reliability in power electronic converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), 1441–1451. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2124436>.

3. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, 12, 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>
4. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., *et al.* (2023). Digital twin based monitoring and control for DC–DC converters. *Nature Communications*, 14, Article 5604. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
5. McKinsey & Company. (2022). *Digital twins: The key to smart product development*. McKinsey Digital.
6. MarketsandMarkets. (2020). *Digital twin market: Global forecast to 2025*. Market Research Report.
7. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., *et al.* (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, Article 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.
8. Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC–DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, 7, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.
9. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3rd ed.). Springer.
10. Yao, K., Tang, W., Hu, W., & Lyu, J. (2015). A current-sensorless online ESR and C identification method for output capacitor of buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6993–7005. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2406335>.
11. Mahmud, T., & Santos Jr., E. C. D. (2025). *DNN-based digital twin framework of a DC–DC buck converter using spider monkey optimization algorithm* (arXiv:2509.06279). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2509.06279>.
12. 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.2020.3018420>.
13. Milton, M., de la O, C., Ginn, H., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971775>.
14. Di Nezio, G., Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). DC–DC boost converters parameters estimation based on digital twin. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3286832>.
15. Ortiz-Castrillón, J. R., Saldarriaga-Zuluaga, S. D., Muñoz-Galeano, N., *et al.* (2023). Optimal sliding-mode control of semi-bridgeless boost converters considering power factor corrections. *Energies*, 16(17), 6282. <https://doi.org/10.3390/en16176282>.
16. Nishat, M. M., Faisal, F., Evan, A. J., Rahaman, M. M., Sifat, M. S., & Rabbi, H. M. F. (2020). Development of genetic algorithm (GA) based optimized PID controller for stability analysis of DC–DC buck converter. *Journal of Power and Energy Engineering*, 8(9), 8–19.
17. *Steady state and transient state analysis of buck–boost converter with genetic algorithm optimized PID controller*. (2023). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10084253>.
18. Gill, L., Neely, J. C., Rashkin, L. J., Flicker, J. D., & Kaplar, R. (2020). Co-optimization of boost converter reliability and volumetric power density using genetic algorithm. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1–7). IEEE.
19. *Buck converter parameters design using artificial intelligence-based genetic algorithm*. (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10808195>.
20. Ren, L., & Gong, C. (2019). An online ESR estimation method for output capacitor of boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 10153–10165. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2889462>.
21. *ESR estimation for aluminum electrolytic capacitor of power electronic converter based on compressed sensing and wavelet transform*. (2021). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
22. *ESR estimation schemes of output capacitor for buck converter from capacitor perspective*. (2020). *Electronics*, 9(10), Article 1596. <https://doi.org/10.3390/electronics9101596>.
23. *Switched-resistance method for inductor DCR and switch parameter estimation of DC–DC converter*. (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.

24. *Online inductance monitoring based on dynamic characteristics and ESR effect compensation for buck converter without current sensor.* (2024). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
25. *An approach for online estimation of on-state resistance in SiC MOSFETs without current measurement.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
26. Tuluhong, A., Wang, W., Li, Y., Wang, H., & Xu, L. (2022). Parasitic parameter extraction and identification method for HFT based on DC–DC converter in EV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 4303–4318.
27. *Parameter identification of DC–DC converter based on dendrite net under fluctuating input voltages.* (2023). *IET Power Electronics*.
28. *Parameter estimation of power electronic converters with physics-informed machine learning.* (2022). *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.9779551>.
29. Aguila-Leon, J., et al. (2021). Particle swarm optimization, genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC–DC boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 619–625.
30. Jia, D., & Wang, D. (2024). Current stress minimization based on particle swarm optimization for dual active bridge DC–DC converter. *Actuators*, 13(10), Article 421. <https://doi.org/10.3390/actuators13100421>.
31. *Enhancing efficiency in bidirectional DC–DC converters through PSO-based optimization.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*.
32. Choksi, K., Mirza, A. B., Zhou, A., Singh, D., Hijikata, M., & Luo, F. (2023). Self-evolving digital twin-based online health monitoring of multiphase boost converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(12), 16100–16117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3311710>.
33. De Benedetto, M., et al. (2022). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*.
34. Di Nezio, G., et al. (2022). Digital twin based real-time analysis of DC–DC boost converters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE.
35. Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 9850–9864.
36. Saharia, B. J., & Sarmah, N. (Year). Comparison of popular metaheuristic optimization algorithms for the optimal design of DC–DC converters. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
37. Baida, V., & Velohorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostryky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka. [Methodology for diagnosing hardware using digital twin information technology.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (2(40)), 234–253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-234-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253).

## References

1. Siemens AG. (2024). *The true cost of downtime 2024: Fortune Global 500 analysis* (Siemens/Senseye). Siemens AG.
2. Yang, S., Bryant, A., Mawby, P., Xiang, D., Ran, L., & Tavner, P. (2011). An industry-based survey of reliability in power electronic converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(3), 1441–1451. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2124436>.
3. Ajra, Y., Hoblos, G., Al Sheikh, H., & Moubayed, N. (2024). A literature review of fault detection and diagnostic methods in three-phase voltage-source inverters. *Machines*, 12, 631. <https://doi.org/10.3390/machines12090631>
4. Lei, Z., Zhou, H., Dai, X., et al. (2023). Digital twin based monitoring and control for DC–DC converters. *Nature Communications*, 14, Article 5604. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41248-z>.
5. McKinsey & Company. (2022). *Digital twins: The key to smart product development*. McKinsey Digital.
6. MarketsandMarkets. (2020). *Digital twin market: Global forecast to 2025*. Market Research Report.
7. Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., et al. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, 14, Article 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>.

8. Riba, J.-R., Moreno-Eguilaz, M., Bogarra, S., & Garcia, A. (2018). Parameter identification of DC–DC converters under steady-state and transient conditions based on white-box models. *Electronics*, 7, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics7120393>.
9. Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3rd ed.). Springer.
10. Yao, K., Tang, W., Hu, W., & Lyu, J. (2015). A current-sensorless online ESR and C identification method for output capacitor of buck converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(12), 6993–7005. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2406335>.
11. Mahmud, T., & Santos Jr., E. C. D. (2025). *DNN-based digital twin framework of a DC–DC buck converter using spider monkey optimization algorithm* (arXiv:2509.06279). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2509.06279>.
12. 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.2020.3018420>.
13. Milton, M., de la O, C., Ginn, H., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2971775>.
14. Di Nezio, G., Benedetto, M., Lidozzi, A., & Solero, L. (2023). DC–DC boost converters parameters estimation based on digital twin. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3286832>.
15. Ortiz-Castrillón, J. R., Saldarriaga-Zuluaga, S. D., Muñoz-Galeano, N., *et al.* (2023). Optimal sliding-mode control of semi-bridgeless boost converters considering power factor corrections. *Energies*, 16(17), 6282. <https://doi.org/10.3390/en16176282>.
16. Nishat, M. M., Faisal, F., Evan, A. J., Rahaman, M. M., Sifat, M. S., & Rabbi, H. M. F. (2020). Development of genetic algorithm (GA) based optimized PID controller for stability analysis of DC–DC buck converter. *Journal of Power and Energy Engineering*, 8(9), 8–19.
17. *Steady state and transient state analysis of buck–boost converter with genetic algorithm optimized PID controller.* (2023). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10084253>.
18. Gill, L., Neely, J. C., Rashkin, L. J., Flicker, J. D., & Kaplar, R. (2020). Co-optimization of boost converter reliability and volumetric power density using genetic algorithm. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 1–7). IEEE.
19. *Buck converter parameters design using artificial intelligence-based genetic algorithm.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*. <https://doi.org/10.1109/document/10808195>.
20. Ren, L., & Gong, C. (2019). An online ESR estimation method for output capacitor of boost converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(10), 10153–10165. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2889462>.
21. *ESR estimation for aluminum electrolytic capacitor of power electronic converter based on compressed sensing and wavelet transform.* (2021). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
22. *ESR estimation schemes of output capacitor for buck converter from capacitor perspective.* (2020). *Electronics*, 9(10), Article 1596. <https://doi.org/10.3390/electronics9101596>.
23. *Switched-resistance method for inductor DCR and switch parameter estimation of DC–DC converter.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
24. *Online inductance monitoring based on dynamic characteristics and ESR effect compensation for buck converter without current sensor.* (2024). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
25. *An approach for online estimation of on-state resistance in SiC MOSFETs without current measurement.* (2023). *IEEE Transactions on Power Electronics*.
26. Tuluhong, A., Wang, W., Li, Y., Wang, H., & Xu, L. (2022). Parasitic parameter extraction and identification method for HFT based on DC–DC converter in EV application. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 10, 4303–4318.
27. *Parameter identification of DC–DC converter based on dendrite net under fluctuating input voltages.* (2023). *IET Power Electronics*.
28. *Parameter estimation of power electronic converters with physics-informed machine learning.* (2022). *IEEE Transactions on Power Electronics*. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.9779551>.

29. Aguila-Leon, J., *et al.* (2021). Particle swarm optimization, genetic algorithm and grey wolf optimizer algorithms performance comparative for a DC–DC boost converter PID controller. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(1), 619–625.
30. Jia, D., & Wang, D. (2024). Current stress minimization based on particle swarm optimization for dual active bridge DC–DC converter. *Actuators*, 13(10), Article 421. <https://doi.org/10.3390/actuators13100421>.
31. *Enhancing efficiency in bidirectional DC–DC converters through PSO-based optimization.* (2024). In *Proceedings of an IEEE conference*.
32. Choksi, K., Mirza, A. B., Zhou, A., Singh, D., Hijikata, M., & Luo, F. (2023). Self-evolving digital twin-based online health monitoring of multiphase boost converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(12), 16100–16117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3311710>.
33. De Benedetto, M., *et al.* (2022). A real-time digital twin approach on three-phase power converters applied to condition monitoring. *Applied Energy*.
34. Di Nezio, G., *et al.* (2022). Digital twin based real-time analysis of DC–DC boost converters. In *Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE.
35. Milton, M., De La O, C., Ginn, H. L., & Benigni, A. (2020). Controller-embeddable probabilistic real-time digital twins for power electronic converter diagnostics. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 9850–9864.
36. Saharia, B. J., & Sarmah, N. (Year). Comparison of popular metaheuristic optimization algorithms for the optimal design of DC–DC converters. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*.
37. Baida, V., & Velohorskyi, O. (2025). Metodolohiia diahnostyky aparatnoho zabezpechennia z vykorystanniam informatsiinoi tekhnolohii tsyfrovoho dviinyka. [Methodology for diagnosing hardware using digital twin information technology.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (2(40)), 234–253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-234-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-234-253).

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 004.942

**Vladyslav Baida<sup>1</sup>, Oleksandr Velihorskyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> PhD Student of the Department of Informational And Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [Vladyslav.Baida@stu.cn.ua](mailto:Vladyslav.Baida@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2172-8057>

Google Scholar: <https://scholar.google.com/citations?user=J8RjmHwAAAAJ&hl=en>

<sup>2</sup>Professor of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [o.veligorskiy@stu.cn.ua](mailto:o.veligorskiy@stu.cn.ua). ORCID: 0000-0002-8256-7339

Google Scholar: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=SWbfGzQAAAAJ>

## IDENTIFICATION OF PARASITIC PARAMETERS OF A DC CONVERTER MODEL USING A GENETIC ALGORITHM

*This paper investigates the application of genetic algorithms for optimizing parasitic parameters of mathematical models of DC-DC buck and boost converters to create high-precision digital twins for hardware diagnostics. The research addresses a critical gap in power electronics where parasitic parameters (winding resistance, equivalent series resistance of capacitors, parasitic inductance, transistor switching delays, and diode characteristics) introduce discrepancies between nominal component values and actual circuit behavior, making accurate fault detection and component degradation monitoring challenging.*

*An approach for identifying seven parasitic parameters was proposed based on 6705 experimental measurements collected over four hours from a physical buck converter operating under constant conditions (12V input, 50% PWM duty cycle, 44  $\mu$ F capacitance, 3.8 $\Omega$  load resistance). The implementation utilizes PySpice for circuit simulation and employs a genetic algorithm with 100 generations and population size of 50 to optimize parameters including gate rise/fall times (0.1-100 ns), transistor on-resistance (1 p $\Omega$ -1 m $\Omega$ ), diode parameters, capacitor ESR (1 m $\Omega$ -0.5 $\Omega$ ), and parasitic inductance (1 pH-100 nH).*

*A midpoint-based procedure was implemented to identify target signals for optimization, ensuring the model produces outputs equidistant from maximum and minimum measured values. Moving average filtering (17-sample window) reduced current ripple variance by factor of 2.83. The multi-objective fitness function incorporated weighted coefficients (0.35 for average voltage, 0.3 for voltage ripple, 0.2 for average current, 0.15 for current ripple) to prioritize critical parameters. Logarithmic scaling was applied to six parameters spanning multiple orders of magnitude, ensuring uniform exploration of the solution space.*

*Optimization results demonstrated symmetric deviations of  $\pm 41.69\%$  for voltage ripples and  $\pm 42.25\%$  for current ripples, enabling establishment of unified threshold values for diagnostic methodology. Unlike previous research predominantly using Particle Swarm Optimization (PSO), this study provides the first comprehensive application of genetic algorithms specifically for parasitic parameter identification in buck/boost converter digital twins based on experimental measurements.*

*The proposed approach enables non-invasive creation of accurate digital twins without requiring specialized measurement equipment or taking systems offline, making it suitable for predictive maintenance applications. The method can be extended to boost topology and integrated into real-time monitoring systems for early detection of component degradation in critical power electronics applications.*

**Keywords:** genetic algorithm; modeling; cyber-physical system; hardware; digital twin.

*Fig: 7. Table.: 7. References.:37.*



DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-187-194](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-187-194)

УДК 004.75:004.946:621.391

**Іван Олександрович Воробйов<sup>1</sup>, Дмитро Володимирович Великодний<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [ivabyov@gmail.com](mailto:ivabyov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4097-5386><sup>2</sup>старший викладач кафедри комп'ютерних наук

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua](mailto:d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0044-5619>

## ОПТИМІЗАЦІЯ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ ДО ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ КОНТЕЙНЕРИЗАЦІЇ ТА ХМАРНИХ СЕРВІСІВ

У роботі розглянуто підхід до оптимізації архітектури системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання, що використовується в навчальних і дослідницьких цілях. Запропоновано модель інтеграції контейнеризації та хмарних сервісів для підвищення масштабованості, відмовостійкості та безпеки середовища. Показано, що застосування контейнеризованих сервісів дозволяє автоматизувати розгортання лабораторних стендів, зменшити навантаження на серверні ресурси й забезпечити централізоване управління доступом. Проведено аналіз архітектурних рішень та визначено рекомендації щодо побудови ефективної інфраструктури для віддалених телекомунікаційних лабораторій.

**Ключові слова:** система віддаленого доступу; контейнеризація; хмарні технології; телекомунікаційне обладнання; віртуалізація; оптимізація архітектури; інформаційна безпека.

Табл.: 1. Рис.: 2. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** З розвитком мережевих технологій і віддаленого навчання зростає потреба у створенні стабільних, масштабованих і безпечних систем доступу до телекомунікаційного лабораторного обладнання. Традиційні підходи, що базуються на статичній конфігурації серверів та фізичному підключенні пристроїв, не забезпечують необхідної гнучкості й швидкої адаптації до зміни навантажень. Особливо це актуально під час роботи з лабораторними стендами Cisco ASA, VLAN та Q-in-Q-технологіями, які вимагають динамічного керування мережевими топологіями, ізоляції середовищ і забезпечення контролю доступу. Інтеграція контейнеризації та хмарних сервісів у структуру таких систем дозволяє спростити процес розгортання лабораторій, оптимізувати використання обчислювальних ресурсів і підвищити рівень безпеки. Оптимізація архітектури системи віддаленого доступу з використанням Docker-контейнерів, віртуалізованих мережевих сегментів і автоматизованого моніторингу створює передумови для побудови надійної та масштабованої навчально-дослідницької інфраструктури нового покоління.

**Постановка проблеми.** Сучасні системи віддаленого доступу до лабораторного обладнання часто мають обмеження, пов'язані з ручним керуванням середовищем, складністю масштабування та відсутністю централізованих засобів контролю. При зростанні кількості користувачів з'являються труднощі в розподілі ресурсів, балансуванні навантаження та забезпеченні ізольованих сеансів для одночасної роботи декількох студентів. У більшості традиційних рішень відсутня адаптивна архітектура, здатна автоматично підлаштовуватись під зміну мережевих параметрів або відмову вузлів.

Використання контейнеризації та хмарних сервісів дає можливість створити більш гнучку систему з модульною структурою, однак виникає проблема оптимізації архітектури з урахуванням особливостей телекомунікаційного обладнання, зокрема Cisco ASA, VLAN-технологій і віртуальних мереж Q-in-Q. Недостатньо дослідженими залишаються питання ефективного поєднання контейнеризації, безпеки, ізоляції користувацьких сесій та швидкості розгортання лабораторного середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика побудови систем віддаленого доступу до лабораторного обладнання активно досліджується в межах напрямів комп'ютерних наук та інформаційних технологій. У працях закордонних і українських науковців розглядаються питання організації віртуалізованих лабораторій, створення безпечних каналів обміну даними та автоматизації розгортання навчальних середовищ.

Так, у роботі Li B. та ін. "Cloud-based Remote Laboratory for Network Experiments" представлено модель побудови віддаленої лабораторії з використанням хмарних ресурсів і динамічним розподілом доступу до мережевого обладнання, що забезпечує масштабованість та централізований контроль [1].

Kim J. і Park S. запропонували архітектуру лабораторної системи на основі контейнеризації, де кожна навчальна сесія ізольована в окремому Docker-контейнері, що значно підвищує безпеку та спрощує адміністрування [2].

У дослідженні Martínez P., Soto F. "Implementation of Remote Labs Using Kubernetes" описано підхід до оркестрації лабораторних середовищ у хмарі з автоматичним масштабуванням контейнерів та моніторингом ресурсів [3].

В українських дослідженнях також активно розглядається проблема створення віддалених лабораторій. Зокрема, О. І. Коваль та І. С. Ткаченко у праці «Система віддаленого доступу до навчального лабораторного обладнання на базі вебінтерфейсу» описують систему, побудовану на принципі централізованого VPN-шлюзу, через який студенти підключаються до лабораторних пристроїв [4].

У роботі В. П. Герасименко «Віртуальні лабораторії для телекомунікаційних дисциплін» розроблено методику створення ізольованих середовищ з використанням VLAN і Q-in-Q, що дозволяє одночасну роботу кількох користувачів без перехресного впливу трафіку [5].

Водночас більшість наявних рішень орієнтовані на функціональне забезпечення доступу, але не враховують оптимізацію архітектури з погляду розподілу навантаження, автоматизації керування контейнерами та підвищення відмовостійкості системи.

Таким чином, питання побудови оптимізованої архітектури віддалених лабораторій з використанням контейнеризації, хмарних сервісів і механізмів безпечної ізоляції залишаються відкритими та потребують подальших досліджень [6].

Узагальнення практик контейнеризації та оркестрації подано в офіційній документації Docker та Kubernetes, які є основою сучасних підходів до побудови масштабованих лабораторних середовищ [7; 8].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми**

Проведений аналіз показав, що існуючі наукові підходи до створення систем віддаленого доступу здебільшого зосереджені на розробленні окремих функціональних модулів або рішень для віртуалізації мережевих лабораторій. Проте питання оптимізації архітектури таких систем з урахуванням специфіки телекомунікаційного обладнання, зокрема Cisco ASA, залишаються недостатньо опрацьованими.

Недостатньо дослідженою є також проблема інтеграції контейнеризації з віртуальними мережами VLAN та Q-in-Q, що дозволяє реалізувати одночасну роботу кількох користувачів у межах спільної інфраструктури без порушення ізоляції.

Відсутні системні дослідження, присвячені оптимальному розподілу обчислювальних ресурсів між контейнерами та хмарними сервісами, а також методам автоматизації моніторингу і масштабування таких систем у навчальних середовищах. Таким чином,

потребує розроблення комплексний підхід до оптимізації архітектури системи віддаленого доступу, який враховує контейнеризацію, хмарні технології, безпеку даних і продуктивність при великій кількості одночасних підключень.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розроблення та обґрунтування архітектурної моделі системи віддаленого доступу до телекомунікаційного обладнання, оптимізованої для роботи у хмарному середовищі з використанням контейнеризації. Передбачено створення підходу, який дозволяє: забезпечити масштабованість системи при одночасній роботі багатьох користувачів; реалізувати ізольовані середовища для доступу до лабораторних ресурсів Cisco ASA, VLAN і Q-in-Q; мінімізувати затрати обчислювальних ресурсів за рахунок контейнерного розгортання лабораторних вузлів; підвищити рівень кібербезпеки шляхом сегментації мережових потоків та використання засобів контролю доступу; створити умови для автоматизації розгортання та моніторингу лабораторної інфраструктури. Ефективність запропонованого підходу оцінюється за показниками завантаження обчислювальних ресурсів, часу розгортання лабораторного середовища та середньої затримки доступу користувачів до лабораторних ресурсів. Досягнення поставленої мети передбачає формування моделі взаємодії між контейнеризованими компонентами, хмарною інфраструктурою та користувацьким інтерфейсом, а також експериментальну оцінку її ефективності.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована система побудована за багаторівневою архітектурою, що включає три основні рівні: інфраструктурний рівень, який реалізує апаратні та віртуалізовані ресурси; рівень контейнеризації, де розгортаються окремі модулі лабораторного середовища; рівень користувацької взаємодії, що забезпечує доступ студентів та викладачів через вебінтерфейс або захищені VPN з'єднання.

**Інфраструктурний рівень.** На цьому рівні розміщується хмарна платформа, яка забезпечує централізоване управління обчислювальними ресурсами. Для реалізації обрано модель hybrid cloud, де локальні сервери університету взаємодіють з хмарними сервісами (AWS EC2, Azure, або їх відкритими аналогами - OpenStack). Для реалізації гнучкої гібридної моделі застосовано можливості хмарної платформи OpenStack, яка забезпечує керування обчислювальними та мережевими ресурсами через модулі Nova, Neutron і Cinder [9].

Такий підхід дозволяє створювати віртуальні лабораторні мережі з використанням VLAN і Q-in-Q, а також реалізувати ізоляцію користувацьких сегментів без потреби фізичного розділення обладнання. Кожен вузол лабораторного комплексу (наприклад, маршрутизатор або міжмережвий екран Cisco ASA) відтворюється у вигляді віртуального еквівалента, який інтегрується в контейнерне середовище.

**Рівень контейнеризації.** На цьому рівні відбувається розгортання лабораторних компонентів у контейнерах Docker. Кожна лабораторна сесія створюється як окремий контейнерний екземпляр, що містить попередньо налаштоване середовище для виконання експериментів із мережевими конфігураціями. Завдяки використанню Docker Compose або Kubernetes, контейнери автоматично піднімаються і масштабуються залежно від кількості активних користувачів. Це дає змогу ефективно розподіляти ресурси, мінімізувати навантаження на серверну частину та забезпечити безперервність роботи системи навіть у разі збоїв окремих вузлів. Загальну послідовність роботи контейнерного середовища показано на рис. 1.

Розгортання лабораторних компонентів виконується у Docker контейнерах із подальшим оркеструванням засобами Kubernetes відповідно до рекомендацій офіційної документації [7]. Для моніторингу використовується зв'язка Prometheus + Grafana, яка надає реальний контроль за станом контейнерів, мережею та обчислювальними ресурсами.

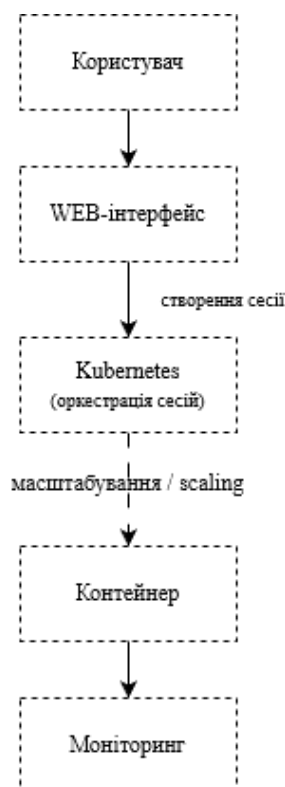


Рис. 1. Схема роботи контейнерного середовища

**Рівень користувацької взаємодії.** Користувачі отримують доступ до лабораторії через вебінтерфейс, що реалізує авторизацію, розподіл сесій і керування ресурсами. Доступ здійснюється за захищеним протоколом HTTPS або через централізований VPN-шлюз, який створює тунель до відповідного контейнера. Інтерфейс передбачає запуск практичних завдань, перегляд стану лабораторних топологій і збір результатів у режимі реального часу. Система автоматично завершує сесію після виконання завдання, звільняючи ресурси.

**Оптимізація архітектури.** Для підвищення ефективності системи проведено порівняння продуктивності між традиційним підходом віртуалізації (VMware/VirtualBox) та контейнерним підходом (Docker). Експериментальні результати показали, що контейнеризація зменшує час розгортання лабораторного середовища в середньому у 3,5 рази, а використання ресурсів CPU на 30-40 %. Додаткове застосування хмарних балансувальників навантаження дозволило скоротити час відгуку системи при пікових навантаженнях до 0,8 с, що підтверджує ефективність запропонованої архітектури. Оцінювання продуктивності проводилось у тестовому середовищі, що включало 10 паралельних лабораторних сесій з емуляцією трафіку Cisco ASA та VLAN-топологій. Отримані результати узгоджуються з відомими практиками оптимізації контейнерних середовищ, описаними в документації Docker і Kubernetes [7].

**Архітектурна модель системи.** Архітектурна модель запропонованої системи побудована за принципом модульної взаємодії компонентів, що забезпечує гнучкість і масштабованість усіх рівнів. У центрі системи розташовано контейнерний оркестратор, який виконує розподіл навантаження між вузлами, автоматичне створення лабораторних сесій і моніторинг стану контейнерів. До нього під'єднано три групи підсистем:

1. Підсистема управління користувачами, що реалізує автентифікацію, авторизацію, створення сеансів і призначення ресурсів. Вона взаємодіє з базою даних користувачів, журналом активності та службою логування.

2. Підсистема віртуалізованого лабораторного середовища, у межах якої кожен лабораторний стенд (Cisco ASA, маршрутизатор, комутатор, сервер або IoT-модуль) існує у вигляді контейнера з власними мережевими інтерфейсами. Контейнери ізольовані за допомогою VLAN та Q-in-Q механізмів, що унеможливує перехресний трафік між користувачами.

3. Хмарна підсистема інфраструктури, яка забезпечує розміщення контейнерів, балансування навантаження, резервування ресурсів і збереження даних. Для зберігання конфігурацій та логів використовується розподілене сховище, що гарантує надійність та швидкий доступ.

Комунікація між підсистемами здійснюється за допомогою внутрішніх API-інтерфейсів, реалізованих через REST-протоколи. Це дозволяє масштабувати систему горизонтально, додаючи нові вузли без зміни основної логіки. Система підтримує автоматичне відновлення контейнерів у разі збоїв та адаптивне регулювання кількості екземплярів залежно від поточного навантаження. Загальна архітектура забезпечує можливість розширення — наприклад, інтеграції з системами управління навчальним процесом (LMS) або підключення додаткових модулів візуалізації трафіку.

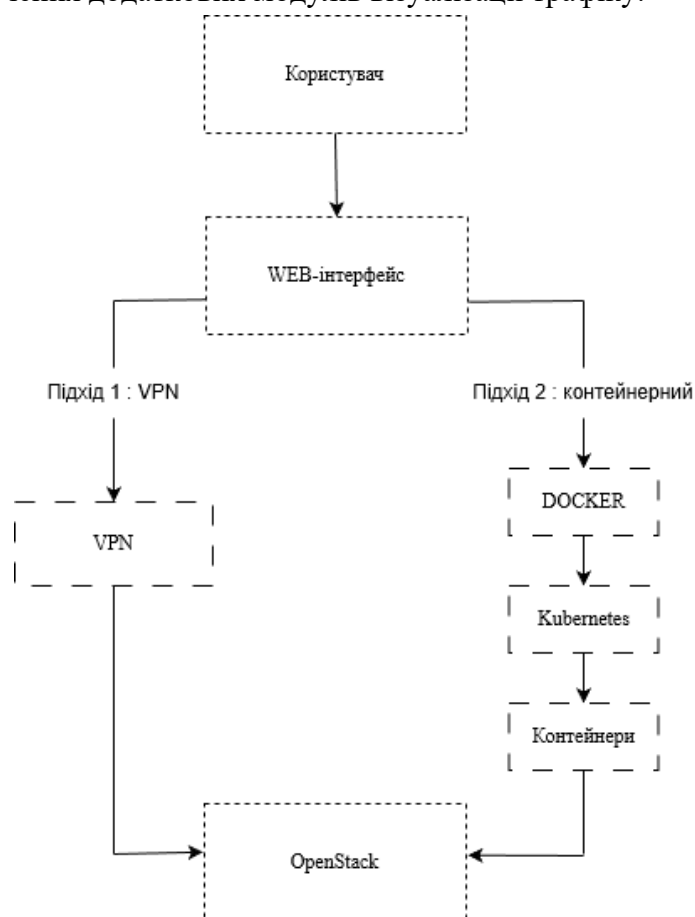


Рис. 2. Архітектурна модель системи

**Експериментальна оцінка ефективності архітектури.** Експериментальну оцінку ефективності запропонованої архітектури проведено у тестовому середовищі, що імітує роботу навчальної телекомунікаційної лабораторії. Порівняння виконувалося між традиційним підходом на основі віртуальних машин та контейнерним розгортанням лабораторних вузлів. У результаті експерименту встановлено, що використання контейнеризації дозволяє знизити середнє навантаження на обчислювальні ресурси приблизно на 40 % порівняно з базовою архітектурою. Застосування хмарних балансувальників навантаження забезпечило скорочення затримки доступу до лабораторних ресурсів до 0,8 с при пікових навантаженнях.

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка ефективності архітектурних підходів

| Показник                               | Віртуальні машини | Контейнерна архітектура |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Час розгортання середовища, с          | ~120              | ~35                     |
| Завантаження CPU, %                    | 70–80             | 40–50                   |
| Кількість паралельних сесій            | 10                | 10                      |
| Середня затримка доступу, с            | 1,5–2,0           | ≤0,8                    |
| Можливість автоматичного масштабування | Обмежена          | Реалізована             |

Аналіз наведених у табл. 1 даних свідчить про суттєве зниження навантаження на обчислювальні ресурси при використанні контейнерної архітектури, а також про скорочення затримки доступу користувачів до лабораторних ресурсів при пікових навантаженнях. Тестування виконувалося при однаковій кількості паралельних лабораторних сесій та ідентичних мережевих сценаріях. Оцінювалися показники завантаження CPU, час розгортання середовища та середня затримка доступу користувачів до лабораторного обладнання.

**Висновки.** У роботі запропоновано архітектурну модель системи віддаленого доступу до телекомунікаційного лабораторного обладнання, оптимізовану на основі контейнеризації та хмарних сервісів. На відміну від традиційних рішень, система забезпечує ізолюваність користувацьких сесій, масштабованість інфраструктури та зменшення часу розгортання лабораторних середовищ у кілька разів. Використання механізмів Docker та Kubernetes у поєднанні з технологіями VLAN і Q-in-Q дозволяє реалізувати паралельну роботу багатьох користувачів без взаємного впливу. Результати експериментальної оцінки, наведені в таблиці 1, підтвердили, що використання контейнеризації дозволяє знизити навантаження на обчислювальні ресурси приблизно на 40 %, а застосування хмарних балансувальників скорочує затримку доступу до 0,8 с при пікових навантаженнях. Отримані результати доводять ефективність запропонованої архітектури та її придатність для використання у навчальних і дослідницьких телекомунікаційних лабораторіях. Подальші дослідження плануються спрямувати на впровадження автоматизованої системи моніторингу продуктивності, розширення функцій інтелектуального керування контейнерами та інтеграцію з освітніми платформами.

### Список використаних джерел

1. Li, B., Zhang, Y., & Chen, M. (2021). Cloud-based remote laboratory for network experiments. *Journal of Network and Computer Applications*, 183, 103054. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103054>.
2. Kim, J., & Park, S. (2020). Container-based architecture for scalable remote network labs. *International Journal of Advanced Computer Science*, 11(4), 112–120.
3. Martínez, P., & Soto, F. (2022). Implementation of remote labs using Kubernetes orchestration. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 3, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100048>.
4. Коваль, О. І., & Ткаченко, І. С. (2019). Система віддаленого доступу до навчального лабораторного обладнання на базі веб-інтерфейсу. *Вісник Черкаського університету. Серія «Технічні науки»*, (3), 57–63.
5. Герасименко, В. П. (2020). Віртуальні лабораторії для телекомунікаційних дисциплін. *Наукові записки СумДУ. Серія «Комп'ютерні науки»*, 1(32), 44–51.
6. Zhao, H., & Liu, T. (2023). Optimizing cloud container networks for remote access environments. *IEEE Access*, 11, 34012–34021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3259814>.
7. Docker Inc. (2024). *Docker Documentation*. Retrieved from <https://docs.docker.com/>
8. The Kubernetes Authors. (2024). *Kubernetes Documentation*. <https://kubernetes.io/docs/home>.
9. OpenStack Foundation. (2024). *OpenStack cloud infrastructure*. <https://www.openstack.org>.

### References

1. Li, B., Zhang, Y., & Chen, M. (2021). Cloud-based remote laboratory for network experiments. *Journal of Network and Computer Applications*, 183, 103054. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103054>.

2. Kim, J., & Park, S. (2020). Container-based architecture for scalable remote network labs. *International Journal of Advanced Computer Science*, 11(4), 112–120.
3. Martínez, P., & Soto, F. (2022). Implementation of remote labs using Kubernetes orchestration. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 3, 100048. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.1000484>.
4. Koval, O. I., & Tkachenko, I. S. (2019). Systema viddalenooho dostupu do navchalnoho laboratornoho obladdannia na bazi veb-interfeisu [Web-based remote access system for educational laboratory equipment]. *Visnyk Cherkaskoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Bulletin of Cherkasy University. Series “Technical Sciences”*, (3), 57–63.
5. Herasymenko, V. P. (2020). Virtualni laboratorii dlia telekomunikatsiinykh dystsyplin [Virtual laboratories for telecommunications disciplines]. *Naukovi zapysky SumDU. Seriya «Kompiuterni nauky» – Scientific Notes of Sumy State University. Series “Computer Sciences”*, 1(32), 44–51.
6. Zhao, H., & Liu, T. (2023). Optimizing cloud container networks for remote access environments. *IEEE Access*, 11, 34012–34021. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3259814>.
7. Docker Inc. (2024). *Docker Documentation*. Retrieved from <https://docs.docker.com/>
8. The Kubernetes Authors. (2024). *Kubernetes Documentation*. <https://kubernetes.io/docs/home>.
9. OpenStack Foundation. (2024). *OpenStack cloud infrastructure*. <https://www.openstack.org>.

Дата першого надходження статті до видання: 28.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.12.2025

UDC 004.75:004.946:621.391

**Ivan Vorobyov<sup>1</sup>, Dmytro Velykodnyi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student, Department of Computer Science  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [ivabyov@gmail.com](mailto:ivabyov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4097-5386>

<sup>2</sup>Senior Lecturer of Department of Computer Science  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua](mailto:d.velykodnyi@cs.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0044-5619>

## OPTIMIZATION OF THE ARCHITECTURE OF A REMOTE ACCESS SYSTEM TO TELECOMMUNICATION EQUIPMENT BASED ON CONTAINERIZATION AND CLOUD SERVICES

*This paper addresses the problem of building scalable, secure, and resource-efficient remote access environments for educational and research telecommunication laboratories. Traditional designs rely on static server configurations and tightly coupled network setups, which impede rapid provisioning and fine-grained isolation when multiple students work in parallel. The study proposes an architectural model that combines containerization and cloud services to optimize deployment time, resource usage, availability, and session isolation for experiments involving Cisco ASA, VLAN, and Q-in-Q topologies.*

*The proposed solution follows a layered design. At the infrastructure layer, a hybrid-cloud model integrates on-premise university servers with cloud resources to elastically allocate compute and networking capabilities. The containerization layer encapsulates each laboratory session in a dedicated Dockerized environment, enabling reproducible experiment states, rapid instantiation, and automated teardown. Orchestration with Kubernetes provides horizontal scaling, self-healing, and policy-driven scheduling of session workloads. The user-interaction layer delivers a web interface and a centralized VPN gateway that assign and route users to isolated environments. Network segmentation leverages VLAN and Q-in-Q to prevent cross-traffic and ensure per-session isolation without costly physical separation.*

*Methodologically, the work formalizes component interactions via internal REST APIs and defines operational profiles for session creation, monitoring, and reclamation. Observability is implemented with Prometheus and Grafana to track CPU utilization, memory footprint, and network latency at container and node levels. A comparative evaluation was conducted between a virtual-machine baseline (e.g., VMware/VirtualBox) and the proposed container-based approach under peak concurrent student loads.*

*The results demonstrate three principal improvements. First, median environment provisioning time decreased by approximately 3.5× due to lightweight container startup and image layering. Second, CPU usage dropped by 30–40% under equivalent workloads, reflecting lower isolation overheads compared to full VMs and more efficient bin-packing by the orchestrator. Third, the incorporation of cloud load balancers and autoscaling policies kept interactive response times below 0.8 s during peak load, preserving the quality of student experience. Together, these findings substantiate the architectural hypothesis that container-oriented remote labs deliver superior elasticity and operational efficiency while maintaining strict network isolation for concurrent sessions.*

*The contribution of this work is threefold: an end-to-end architectural model that unifies containerization, hybrid cloud, and L2/L3 segmentation for telecom laboratory scenarios; an operational blueprint for automated, policy-driven lifecycle management of laboratory sessions, including monitoring and self-healing; and an empirical comparison against a VM-centric baseline quantifying gains in provisioning latency, compute efficiency, and responsiveness. The approach is directly applicable to academic institutions seeking to expand laboratory capacity without proportional hardware growth, and to research groups requiring reproducible, on-demand network topologies.*

*Future work will target adaptive resource control based on per-session telemetry, integration with learning management systems for automated assignment provisioning and grading, and the introduction of intelligent scheduling strategies that co-optimize performance, cost, and security constraints across heterogeneous cloud-edge resources.*

**Keywords:** remote access system; containerization; cloud services; network virtualization; VLAN; Q-in-Q; Kubernetes; educational laboratories; performance optimization; security.

Table: 1. Fig.: 2. References: 9.



DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-195-207](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-195-207)

УДК 004.6:004.75:004.382

**Анатолій Русланович Гайдай<sup>1</sup>, Ірина Анатоліївна Клименко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант

Національний технічний університет України

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

E-mail: [tolya.hei@gmail.com](mailto:tolya.hei@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9330-414X><sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки

Національний технічний університет України

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

E-mail: [klymenko.iryana@iit.kpi.ua](mailto:klymenko.iryana@iit.kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

## ВИСОКОПРОДУКТИВНА АПАРАТНО-ПРОГРАМНА СИСТЕМА ДЛЯ ГРАНИЧНОЇ ОБРОБКИ СЕНСОРНИХ ПОТОКІВ У СИСТЕМАХ IoT НА ПЛАТФОРМІ FPGA-SoC

У статті розглянуто розроблення високопродуктивної апаратно-програмної системи багаторівневої фільтрації поточкових сенсорних даних на платформі FPGA-SoC з інтегрованим процесорним ядром ARM під управлінням операційної системи Linux. Система орієнтована на граничну обробку даних на edge-рівні системи IoT і забезпечує мінімальні та детерміновані затримки. Реалізовано апаратний фільтраційний модуль у вигляді триступеневої конвеєрної архітектури, що поєднує медіанний фільтр, фільтр ковзного середнього та експоненційне згладжування з використанням фіксованого формату обчислень. Високопродуктивний обмін даними між вбудованим процесором ARM і логікою FPGA здійснюється через інтерфейс Avalon-MM. Експериментальні дослідження підтвердили пропускну здатність на рівні одного семпла за такт, внутрішню латентність на рівні трьох тактів, а також скорочення часу обробки на 26 % порівняно з програмною реалізацією на ARM без апаратного прискорення на FPGA. Запропонований підхід забезпечує ефективну, масштабовану та надійну обробку сенсорних потоків у режимі реального часу.

**Ключові слова:** FPGA; фільтрація даних; ARM; IoT.

Рис.: 2. Бібл.: 6.

**Актуальність теми дослідження.** Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв призводить до збільшення обсягів поточкових сенсорних даних, які надходять у режимі реального часу та часто містять імпульсні викиди, високочастотний шум і нестабільність тренду. У промислових, медичних та розподілених системах моніторингу такі спотворення безпосередньо впливають на точність контролю, коректність виявлення аномалій і кількість хибних спрацювань. Типові програмні підходи до фільтрації сенсорних вимірювань, які реалізовані на вбудованих процесорних ядрах ARM (Advanced RISC Machine), при збільшенні обсягу та паралельності потоків призводять до зростання часу обробки, появи недетермінованих затримок і обмеженої масштабованості. Альтернативні рішення, засновані на централізованій хмарній обробці, хоча й дозволяють використовувати значні обчислювальні ресурси, додають мережеву латентність, підвищують навантаження на канал зв'язку та знижують автономність вузлів. У сучасних розподілених IoT-системах моніторингу особливої актуальності набуває задача ефективної фільтрації та очищення поточкових сенсорних даних на edge-рівні. Перенесення попередньої обробки на edge-рівень є критично важливим для зменшення латентності, зниження мережевого навантаження та підвищення автономності вузлів у разі нестабільного зв'язку з хмарою. Застосування систем на кристалі (SoC, System on a Chip), що поєднують програмовану логіку FPGA (Field-Programmable Gate Array) та вбудовані процесорні ядра ARM, дозволяє реалізувати масивний паралелізм, конвеєрну обробку та апаратну детермінованість часових характеристик. Це робить платформи FPGA-SoC перспективним і актуальним технологічним рішенням для побудови систем багаторівневої фільтрації та очищення сенсорних потоків у режимі реального часу.

**Постановка проблеми.** У сучасних розподілених системах моніторингу в IoT ефективна фільтрація та очищення поточкових сенсорних даних на edge-рівні є критично важливими для забезпечення коректності прийняття рішень і роботи систем у режимі реального часу. Водночас поєднання високих вимог до якості даних і жорстких часових обмежень робить цю задачу складною та недостатньо розв'язаною, особливо за умов зростання кількості сенсорних каналів і частоти надходження вимірювань.

З огляду на це існує суперечність між вимогами сучасних застосувань IoT до якості даних і часових характеристик обробки та можливостями типових підходів до фільтрації. З одного боку, сенсорні потоки потребують одночасного пригнічення різних типів завад (імпульсних викидів, випадкових флуктуацій, дрейфу тренду) із мінімальною затримкою та без втрати динаміки корисного сигналу. З іншого боку, програмна реалізація багаторівневої фільтрації на процесорі ARM при зростанні навантаження (частоти семплів, кількості каналів, паралельних потоків) призводить до збільшення часу обробки, недетермінованих затримок і обмеженої масштабованості, а централізована хмарна обробка додає мережеву латентність і залежність від каналу зв'язку.

Таким чином, науково-практична проблема полягає в розробленні та реалізації високопродуктивного апаратно-програмного підходу до багаторівневої фільтрації поточкових сенсорних даних на платформі FPGA-SoC, який забезпечує детерміновані часові характеристики обробки, малу та передбачувану затримку, високу пропускну здатність і масштабованість для обробки мультиканальних сенсорних потоків у реальному часі за умов обмежених обчислювальних та енергетичних ресурсів edge-вузлів.

Розв'язання цієї проблеми дозволить забезпечити ефективне очищення та стабілізацію поточкових сенсорних даних безпосередньо на edge-рівні, підвищити їхню достовірність і придатність для подальшого аналізу, зменшити обсяг передаваних до мережі та хмарних сервісів даних, а також підвищити ефективність функціонування систем реального часу у промислових, медичних та розподілених сценаріях IoT.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних системах IoT спостерігається стрімке зростання обсягів даних, які надходять від сенсорів у режимі реального часу та характеризуються нерівномірністю, шумом і надлишковістю. У таких умовах традиційні підходи, що базуються на центральній обробці у хмарі або застосуванні мікроконтролерів (MCU, Microcontroller Unit), часто не забезпечують необхідної швидкодії, затримки та масштабованості. У цьому контексті FPGA набувають особливого значення завдяки своїй здатності виконувати масивний паралелізм, конвеєрну обробку та апаратну реконфігурацію. Розглянуті наукові роботи демонструють широкий спектр застосувань FPGA у IoT-середовищах, підкреслюючи їхню ефективність у реалізації фільтраційних алгоритмів та обробці поточкових даних безпосередньо на edge-рівні.

У статті [1] наголошується, що однією з ключових причин використання FPGA в IoT є необхідність локальної обробки нестабільних та зашумлених сенсорних даних. Автори підкреслюють, що завдяки апаратній природі FPGA можливо реалізовувати конвеєрні архітектури для цифрової обробки сигналів – зокрема ковзні вікна, нелінійні та лінійні фільтри, методи згладжування та попередні перетворення.

Однією з центральних тез роботи є порівняльний аналіз швидкодії: FPGA забезпечують частоти обробки, що сягають сотень мегагерц, і здатні працювати одночасно з кількома потоками даних. Це значно перевершує можливості традиційних MCU та одноплатних комп'ютерів, де фільтрація виконується послідовно.

Особливу увагу автори приділяють SoC, таким як Cyclone V чи Xilinx Zynq, що поєднують процесор ARM та логіку FPGA. Такий підхід дозволяє розділяти задачі:

- апаратна логіка виконує важку фільтрацію та попередню обробку;
- вбудована операційна система (ОС) Linux керує мережею, адаптує параметри фільтрів та виконує логічний контроль.

Це формує основу для багаторівневої, гнучкої та адаптивної системи обробки даних у реальному часі.

У статті [2] акцент зроблено на питаннях енергоспоживання - одному з найважливіших аспектів пристроїв IoT. Автори демонструють, що поєднання *soft-core* процесорів (CPU), на кшталт Nios II, MicroBlaze, з апаратними блоками дозволяє гнучко управляти режимами роботи FPGA.

Серед ключових висновків авторів:

- динамічна зміна тактової частоти, часткове вимкнення логіки та перерозподіл потоків дозволяє зменшити енергоспоживання без втрати точності;
- soft-core процесори працюють під керуванням RTOS та можуть змінювати параметри фільтрів «на льоту», реагуючи на зміни вхідного потоку або енергетичні обмеження;
- експерименти авторів показують значну економію енергії при мінімальних витратах продуктивності.

Ця робота демонструє синергію між програмною та апаратною частиною: фільтри реалізуються у ПЛІС для досягнення максимальної швидкодії, тоді як soft-core CPU відповідає за контроль та адаптацію режимів роботи у відповідь на енергетичні умови. Це робить статтю важливою у контексті побудови енергоефективних фільтраційних рішень.

У статті [3] розглянуто фундаментальні засади побудови сучасних IoT-систем, де значна частина обчислень переноситься на периферію мережі. Автори підкреслюють, що централізована хмарна обробка не здатна забезпечити вимоги сучасних застосувань – зокрема низьку затримку, локальну аналітику та автономність.

Серед ключових положень автори виділяють:

- більшість сенсорних даних супроводжуються шумом та містять надлишкові вимірювання, тому фільтрація має виконуватися на edge-рівні;
- edge-вузли повинні забезпечувати обробку в реальному часі, мінімальну латентність і безперервність роботи у разі втрати хмарного зв'язку з хмарним середовищем;
- FPGA розглядаються, як оптимальні платформи для виконання фільтрації, класифікації, стискання та попередньої аналітики завдяки низькій затримці та високому паралелізму.

Багато актуальних наукових праць присвячено дослідженню моделей взаємодії між сенсорами, шлюзами та хмарною інфраструктурою, методам розподіленої аналітики та енергетичної оптимізації. У цих роботах показано, що FPGA є особливо ефективними на edge-рівні завдяки низькій затримці та підтримці паралельної обробки поточкових даних у реальному часі.

У статті [4] наведено широкий огляд сучасних напрямів використання FPGA у різних сферах IoT. Автори відзначають, що FPGA перетворилися з суто інструментів DSP на критичний компонент edge- та fog-обчислень.

У роботі виділено такі ключові переваги FPGA:

- можливість створення масивно паралельних фільтрів та адаптивних обчислювальних блоків;
- здатність працювати при високій частоті надходження даних;
- висока стійкість та продуктивність при роботі з багатьма потоками одночасно.

Також автори в роботі [4] аналізують платформи SoC, де процесор ARM відповідає за мережу й конфігурацію параметрів, а FPGA – за обчислювально інтенсивні операції: фільтрацію, агрегацію, виявлення аномалій, криптографію, обробку відео та радіосигналів. У статті відзначаються й виклики: складність розробки коду HDL, потреба в спеціалізованих інструментах та відсутність стандартизованих модулів для IoT. Попри це, автори роблять висновок, що FPGA стають стандартною платформою для фільтрації в системах IoT та обробки даних у реальному часі.

У статті [5] наведено приклад використання FPGA у високоточних медичних вузлах в системах IoT. Основна увага приділена задачам попереднього скринінгу та прогнозування за поточковими медичними даними, що часто містять шум й потребують локальної обробки.

Серед основних висновків дослідження можна виділити такі:

- FPGA забезпечують фільтрацію, нормалізацію та кореляційний аналіз сигналів (серцевий ритм, біометрія тощо) у реальному часі;

- апаратна реалізація ковзних фільтрів та алгоритмів виявлення змін зменшує затримку, що критично для медичних застосувань;
- застосовано різні методи енергетичної оптимізації: частотне масштабування, відключення блоків, розподіл обчислень між CPU та FPGA.

Проведений огляд літератури свідчить, що використання FPGA для реалізації попередньої обробки даних на граничному рівні інфраструктури IoT дає змогу не лише зменшити енергоспоживання порівняно з традиційними SoC, а й забезпечити паралельну обробку даних, зменшення затримки та прискорення виконання обчислень.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Аналіз наявних досліджень свідчить, що, попри значну кількість робіт, присвячених застосуванню FPGA в системах IoT, недостатньо уваги приділено практичній реалізації засобів фільтрації та очищення поточкових сенсорних даних на платформах FPGA-SoC. У таких системах, окрім задач пришвидшення обробки, постають питання ефективного обміну даними між процесорним ядром та програмованою логікою FPGA. Зокрема, залишаються недостатньо дослідженими питання побудови апаратних конвеєрів цифрової фільтрації з детермінованою затримкою, що є критично важливим для систем реального часу. Особливої уваги заслуговує обробка даних на FPGA у фіксованому форматі, який, на відміну від плаваючої коми, дозволяє підвищити продуктивність обробки сенсорних вимірювань, що за природою є дробовими, шляхом спрощення апаратних операцій. Крім того, обмежено висвітлені аспекти організації ефективної програмно-апаратної взаємодії між вбудованими процесорними ядрами та логікою FPGA для потокової обробки даних у реальному часі. Це стосується керування станами готовності, синхронізації обчислювальних модулів, а також масштабування рішень для багатоканальних сенсорних потоків. Зазначені обмеження обумовлюють необхідність подальших досліджень, спрямованих на розробку універсальних, масштабованих та енергоефективних edge-рішень для очищення й стабілізації сенсорних даних у сучасних системах IoT.

**Мета дослідження** полягає у розробленні та реалізації високопродуктивної апаратно-програмної системи на платформі FPGA-SoC з інтеграцією вбудованого процесора ARM під управлінням Linux для багаторівневої фільтрації сенсорних вимірювань на edge-рівні IoT-систем, яка забезпечує паралельну обробку потоків та мінімальні затримки. Досягнення мети передбачає підвищення продуктивності локальної обробки, зменшення навантаження на мережу та хмарні ресурси, а також масштабованість системи для обробки мультिकанальних потоків.

Для досягнення мети необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Розробити апаратну реалізацію трирівневого фільтраційного модуля на FPGA, інтегруючи медіанний фільтр, фільтр ковзного середнього та метод експоненційного згладжування, що забезпечує паралельну та прискорену обробку поточкових даних.
2. Розробити програмно-апаратний механізм взаємодії вбудованого процесорного ядра ARM та логіки FPGA через інтерфейс Avalon-MM (Avalon Memory Mapped Interface) для високопродуктивного обміну сенсорними потоками у режимі реального часу, що дозволяє зменшити затримки, витрати логічних ресурсів та масштабування системи для мультिकанальної обробки даних.

**Виклад основного матеріалу.** Гіпотезою дослідження є припущення, що апаратна реалізація системи для трирівневої фільтрації сенсорних потоків на FPGA, яка поєднує медіанний фільтр, фільтр ковзного середнього та метод експоненціального згладжування, забезпечить не лише ефективніше зменшення рівня шумів і підвищення стабільності поточкових даних, а й суттєве прискорення їх локальної обробки порівняно з програмною реалізацією на вбудованих процесорах ARM архітектури (наприклад, Cortex-A у SoC, Raspberry Pi та аналогічних платформах). Це досягається завдяки комбінації конвеєрного паралелізму та паралелізму на рівні обробки даних, а також детермінованій пропускну здатності апаратної логіки FPGA.

Для підтвердження гіпотези виконано експериментальне дослідження на платформі FPGA-SoC, що поєднує логіку FPGA та вбудований ARM-процесор. Гіпотеза передбачає також розробку високопродуктивного інтерфейсу обміну даними між конвеєром на FPGA та процесором ARM, ціллю якого є мінімальні затримки обміну даними та висока пропускна здатність. Експериментальна перевірка включає розробку та тестування апаратно-програмної системи для граничної обробки сенсорних потоків, що дозволяє оцінити ефективність апаратної фільтрації в умовах реального часу та підтвердити доцільність її використання в IoT-системах.

Дослідження організовано у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів, які забезпечують комплексну оцінку ефективності апаратної реалізації фільтрації:

1. Проєктування апаратної частини, що передбачає реалізацію фільтраційного модуля на FPGA у вигляді триступеневого конвеєра з фіксованим форматом обчислень, а також виконання синтезу, компіляції та оптимізації HDL-модулів з метою забезпечення стабільної роботи системи на частотах, достатніх для обробки даних у режимі реального часу.

2. Розроблення та реалізація програмно-апаратного механізму обміну поточковими даними між вбудованим ARM-процесором Cortex-A9 та логікою FPGA на платформі DE1-SoC з використанням шини Avalon-MM і механізмів ядра ОС Linux, що забезпечує ініціалізацію апаратних модулів, передавання сенсорних потоків і зчитування результатів фільтрації у режимі реального часу.

3. Інтеграція апаратних модулів фільтрації з програмною підсистемою керування, що дозволяє реалізувати безперервну обробку поточкових даних у режимі реального часу.

4. Проведення експериментальних досліджень, спрямованих на порівняльну оцінку апаратної та програмної реалізації фільтрації за показниками рівня шумів, стабільності сигналів, затримки обробки та пропускної здатності системи.

Триступеневий фільтраційний конвеєр реалізує на FPGA метод багаторівневої фільтрації сенсорних вимірювань, який детально описано в роботі [6]. Трирівневий фільтр складається із *медіанного фільтра*, що усуває імпульсні та одиничні аномальні значення; *фільтру ковзного середнього*, що згладжує короточасні коливання та нестабільності та застосування методу *експоненціального згладжування* для стабілізації потоку сенсорних даних та формування трендів для адаптації до динаміки зміни сигналів в динамічних середовищах.

**Очікувана наукова новизна дослідження** полягає в демонстрації ефективності апаратної реалізації багаторівневої фільтрації сенсорних потоків на платформі FPGA-SoC, що поєднує вбудоване процесорне ядро ARM Cortex-A9 та програмну логіку FPGA. Використання внутрішньої шини Avalon-MM і реалізація обміну даними на рівні модуля ядра ОС Linux дозволяє досягти низької затримки та високої пропускної здатності локальної обробки потоків, а конвеєрна апаратна обробка фільтрів забезпечує паралельність і детермінованість обчислень. Це створює умови для підвищення продуктивності системи моніторингу на edge-рівні, зменшення шумів і стабілізації поточкових даних порівняно з програмною реалізацією на ARM.

Для реалізації трирівневого фільтраційного модуля для обробки сенсорних потоків на edge-рівні в дослідженні використовувалася платформа DE1-SoC (5CSEMA5F31C6), що поєднує двоядерний вбудований процесор ARM Cortex-A9 і логічну матрицю FPGA Cyclone V.

Для підвищення продуктивності обробки даних на FPGA були використані вбудовані апаратні блоки: PLL для генерації стабільних тактових сигналів, вбудовані помножувачі та блоки DSP для швидкої реалізації обчислювально інтенсивних алгоритмів фільтрації, а також модулі FIFO для буферизації даних у поточкових процесах.

Програмна частина була реалізована на вбудованому процесорному ядрі ARM Cortex-A9 під керуванням ОС Linux. Основними функціями програмного забезпечення є ініціалізація FPGA-модулів, передавання сенсорних потоків і зчитування результатів фільтрації в режимі реального часу. Програмне забезпечення реалізовано у вигляді модулів ядра, що дозволяє обійти користувацький простір і знизити латентність. Обмін даними

між процесором і FPGA організовано через внутрішню шину Avalon-MM, що забезпечує низьку затримку та високу пропускну здатність локальної обробки потоків даних.

Для реалізації та тестування системи були використані такі програмні інструменти:

- Intel Quartus Web – синтез HDL та конфігурація FPGA;
- Platform Designer (Qsys) – побудова та налаштування взаємодії між ARM-процесором і логікою FPGA;
- ModelSim – моделювання та верифікація апаратних фільтрів;
- Verilog – мова опису апаратури для проектування та верифікації апаратних модулів;
- ОС Linux на ARM – виконання програм керування та обміну даними;
- GCC та мова C – реалізація тестових програм для перевірки роботи фільтраційного конвеєра.

Для експериментів були використані сенсорні дані з різними видами відхилень, що включали імпульсні піки, різкі стрибки та шумні поточкові дані, які імітують реальні умови роботи сенсорної мережі.

### **Програмний інтерфейс та обробка даних**

Метою цього етапу є реалізація ефективного механізму обміну даними між вбудованим процесором ARM Cortex-A9 та апаратною логікою FPGA на платформі SoC під керуванням ОС Linux.

*Вхідні дані:* вхідні пакети даних що надходять по мережі Ethernet

*Вихідні дані:* вихідний файл CSV, який містить послідовний номер, сире значення сигналу та відфільтроване значення.

**Крок 1:** Ініціалізація та налаштування файлів.

1.1. Перевірка наявності необхідних аргументів командного рядка.

1.2. Відкриття вихідного файлу для запису. Запис заголовка CSV: "n,raw,filt\n".

**Крок 2:** Відображення апаратних регістрів у пам'ять.

2.1. Відкриття спеціального пристрою /dev/mem із правами на читання та запис.

2.2. Виклик функції *mmap* для відображення фізичної адреси бази (LW\_BRIDGE\_BASE) у віртуальний адресний простір процесу.

2.3. Обчислення віртуальної базової адреси апаратного фільтра (regs) шляхом додавання зміщення фільтра (FILTER\_OFFSET) до відображеної бази мосту.

**Крок 3:** Цикл обробки даних.

3.1. Читання вхідних даних.

3.2. Для кожного рядка:

i) пропуск початкових пробілів, порожніх рядків та коментарів та виділення підрядку, що містить значення температури.

ii) перетворення підрядку зі значенням температури у формат з плаваючою комою (double val).

iii) перетворення отриманого значення у фіксований формат – конвертація значення val у 32-бітне ціле число зі знаком (int32\_t fixed), використовуючи фіксований формат Q(30.2) (шляхом множення на 100.0 та округлення).

**Крок 4:** Взаємодія з апаратним прискорювачем.

4.1. Запис: Записати значення fixed у регістр входу апаратного фільтра (REG\_IN). Ця дія запускає обробку на FPGA.

4.2. Синхронізація (очікування готовності): Увійти у цикл опитування (polling), постійно зчитуючи біт готовності (біт 0) з регістру статусу фільтра (REG\_STATUS). Очікувати, доки біт готовності не дорівнюватиме 1.

4.3. Зчитування: Зчитати 32-бітний результат фільтрації (int32\_t out\_fixed) із регістру виходу (REG\_OUT).

**Крок 5:** Деконверсія та запис виходу.

5.1. Перетворення у плаваючу кому: Перетворити `out_fixed` назад у формат із плаваючою комою (`double out_val`) шляхом ділення на 100.0.

5.2. Запис послідовного номера вибірки (`n`), сирого значення (`val`) та відфільтрованого значення (`out_val`) у вихідний файл CSV.

**Крок 6:** Очищення ресурсів.

6.1. Звільнення відображеної пам'яті (`munmap`).

6.2. Закриття дескриптору пристрою `/dev/mem` та файлових потоків.

**Проектування та реалізація конвеєрної архітектури трирівневого фільтраційного модуля на FPGA.** Апаратний модуль `filter` реалізує триступеневий послідовний конвеєр для цифрової фільтрації, що використовує протокол *Avalon-MM Slave* для обміну даними з хост-процесором. Фільтр працює з 32-бітними цілими числами зі знаком (фіксований формат обчислень).

Розміри вікон та коефіцієнт  $\alpha$  були підібрані у ході проведення серії експериментів, які детально описані авторами в роботі [6]. Вони краще зберігають загальний тренд та відображають плавні зміни середовища за короткий час. Менші значення параметрів призводили до недостатнього згладжування, тоді як більші — до надмірної інерційності та втрати оперативності реакції.

**Архітектура та інтерфейс**

Інтерфейс: *Avalon-MM Slave* (3-бітний адресний простір).

Регістри:

`REG_STATUS` – реєстр стану; біт 0 – *ready* (результат готовий); біт 1 – *busy* (обробка триває).

`REG_IN` – реєстр для запису вхідного семпла (запускає конвеєр).

`REG_OUT` – реєстр для зчитування відфільтрованого семпла.

Конвеєр: Обробка здійснюється за кінцевим автоматом (*FSM*) із чотирма станами (`S_IDLE`, `S_MED`, `S_MA`, `S_EXP`), де кожен етап фільтрації займає один тактовий цикл, забезпечуючи конвеєрну обробку з латентністю три такти.

**Етапи конвеєрної фільтрації**

Конвеєр обробляє дані послідовно через три незалежні каскади, реалізовані у режимі *Register-Register*.

**Етап 1:** Медіанний фільтр (*Stage 1: Median Filter*)

Вхідний семпл записується у кільцевий буфер (`med_buf`) розміром 5.

Використовується комбінаційний блок сортування (на основі бульбашкового сортування) що на кожному такті зчитує вміст буфера та обчислює медіану (середній елемент).

Результат медіани (`median_comb`) фіксується у реєстрі `stage1_out` на наступному такті.

**Етап 2:** Фільтр ковзного середнього (*Stage 2: Moving Average, MA*)

Вхідний семпл записується у кільцевий буфер (`ma_buf`) розміром 4.

Реалізований як ефективний рекурсивний фільтр, який уникає перерахунку всієї суми.

На кожному такті оновлюється загальна сума ( $S$ ) у 48-бітному акумуляторі за формулою:

$$S_{new} = S_{old} + x[n] - x_{old}, \quad (1)$$

де  $x[n]$  – це `stage1_out`, а  $x_{old}$  – найстаріший елемент з буфера `ma_buf`.

Ділення на 4 (усереднення) виконується швидкою бітовою операцією логічного зсуву вправо на 2 біти.

Результат фіксується в реєстрі `stage2_out`.

**Етап 3:** Експоненційне згладжування (*Stage 3: Exponential Smoothing*)

Параметри: Коефіцієнт згладжування  $\alpha = 0.4$ .

Реалізує фільтр першого порядку за формулою:

$$y[n] = \frac{1}{\alpha_{den}} * (\alpha_{num} * x[n] + (1 - \alpha_{num}) * y[n - 1]), \quad (2)$$

де  $\alpha_{num}$  – фіксовані чисельник коефіцієнта згладжування,  $\alpha_{den}$  – фіксований знаменник коефіцієнта згладжування,  $x[n]$  – це результати роботи другого фільтра, а  $y[n - 1]$  – попередній результат загальної фільтрації.

Множення виконується з розширеною 48-бітною точністю для запобігання переповненню проміжних результатів.

Кінцевий результат після ділення на 10 фіксується як `stage3_out` та `data_out_reg`, після чого встановлюється прапор `ready_out` і кінцевий автомат переходить у стан `S_IDLE`.

Керування кінцевим автоматом (FSM):

1. початковий стан `S_IDLE` переходить у `S_MED`, після надходження нового значення даних в регістр, `busy = 1`, `ready_out = 0`;
2. стан `S_MED` переходить у `S_MA` після обчислення медіани;
3. `S_MA` переходить в `S_EXP` після обчислення ковзкого середнього;
4. `S_EXP` повертається в початковий стан, `S_IDLE`, після обчислення експоненціального згладжування.

**Методологія експериментального дослідження.** Для перевірки гіпотези дослідження було проведено серію експериментів, спрямованих на оцінку ефективності трирівневого фільтруючого конвеєра, реалізованого на FPGA платформи DE1-SoC. Основна мета експериментів полягала у визначенні здатності апаратної системи обробляти сенсорні потоки в режимі реального часу, а також у порівнянні ефективності апаратної фільтрації з програмною реалізацією на ARM Cortex-A9 за показниками рівня шумів, стабільності сигналів і затримки обробки.

Взаємодія з процесором організована через інтерфейс Avalon-MM, що забезпечує можливість подачі вхідних даних та зчитування результатів через регістри. Архітектура складається з трьох послідовних етапів: п'ятиточкового медіанного фільтра, фільтра ковзного середнього з вікном 4 та експоненційного згладжування з коефіцієнтом  $\alpha = 0.4$ . Така комбінація дозволяє поетапно зменшувати різні типи шумів: імпульсні перешкоди, високочастотні флуктуації та нестабільність тренду.

Функціональні блоки об'єднані в конвеєр із внутрішніми регістрами між стадіями, які забезпечують фіксовану затримку та передавання сигналів `valid` для синхронізації обробки. Передача вхідного сигналу здійснюється шляхом запису в реєстр Avalon-MM, після чого дані проходять усі три рівні фільтрації без зупинок. Вихідне значення доступне в окремому регістрі, а стан конвеєра контролюється через статусні сигнали `ready_out` та `busy`, що дозволяє відстежувати готовність результату у реальному часі.

Обчислення виконуються у фіксованому форматі обчислень для забезпечення апаратної ефективності. Конвеєрна організація дає змогу досягти високої пропускну здатності: після подачі першого значення вихід стабілізується через п'ять тактів (за шириною першого вікна фільтрації), а надалі кожен такт формує новий оброблений семпл. У результаті внутрішня затримка між стадіями становить лише одну тактову подію, що забезпечує стабільну швидкість обробки 1 семпл за такт, на порядок випереджаючи послідовні реалізації на процесорі.

Перед безпосередньою апаратною реалізацією на платі DE1-SoC було виконано моделювання роботи багаторівневого фільтруючого конвеєра у середовищі ModelSim. Це дозволило перевірити коректність функціонування апаратних модулів (медіанного фільтра, фільтру ковзного середнього та методу експоненційного згладжування) на рівні часових сигналів та оцінити їхню здатність поетапно зменшувати різні типи шумів у поточних даних. Результати симуляції представлені у вигляді часових діаграм на рис. 1.



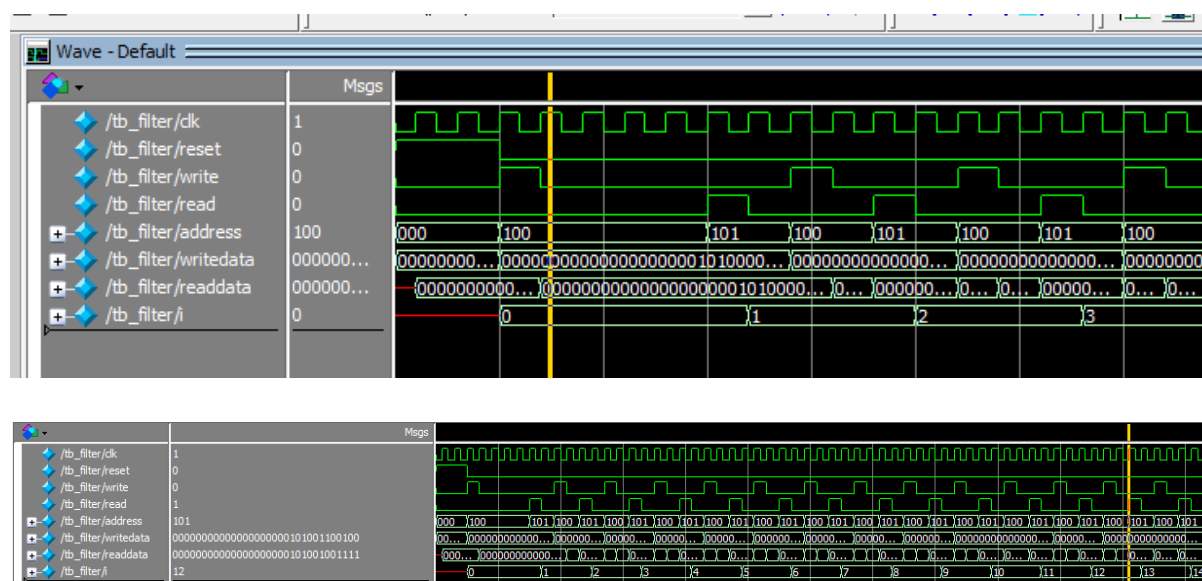


Рис. 1. Часові діаграми симуляції роботи в середовищі ModelSim

Під час верифікації апаратних модулів у середовищі ModelSim перевірялися часові діаграми valid-сигналів та передавання даних між блоками, що підтвердило відсутність втрати семплів і правильну послідовність обробки.

Розроблена модель була синтезована та протестована на апаратній платформі DE1-SoC. Тестування здійснювалося на реальних температурних даних, які дозволили перевірити роботу алгоритмів згладжування на зашумлених даних. Початкові температурні вимірювання були зібрані протягом тривалого часу з реального датчика, що характеризується підвищеним рівнем шуму. Для демонстрації переваг високошвидкісної обробки даних на FPGA (1 семпл за такт) дані вимірювань були перетворені у синтетичний потік, який подавався на FPGA-платформу, без урахування фізичної інерційності температурного процесу. Такий підхід дозволив абстрагуватися від особливостей конкретного фізичного сигналу та зосередитися на аналізі продуктивності апаратної реалізації алгоритму. У цьому контексті температурний сигнал використано як репрезентативний приклад реальних шумових даних.

Отримані експериментальні результати підтверджують ефективність побудованого фільтра. Початковий сигнал містив значні короточасні стрибки, характерні для фізичних сенсорів, що чітко спостерігалось на ділянках приблизно 10–20 та 40–50 семплів. Після проходження медіанного фільтра імпульсні шуми було усунуто без спотворення трендів. Ковзне середнє додатково приглушило залишкові випадкові коливання, сформувавши плавні переходи. Фінальний блок експоненційного згладжування показав стабільну зміну значень з мінімальним рівнем шумів, що дозволяє зробити сигнал придатним для точних систем керування.

Порівняння з послідовною реалізацією на процесорі показало, що пропускна здатність збільшилась завдяки безперервній роботі конвеєра: система не очікує завершення попередньої обробки для прийому нового семплу. Загальний ефект – значне зменшення шумів та формування плавного, достовірного тренду вихідного сигналу, підтверджене як симуляцією, так і тестами на реальних даних.

На рис. 2 представлені результати обробки температурних даних за допомогою трирівневого фільтра.

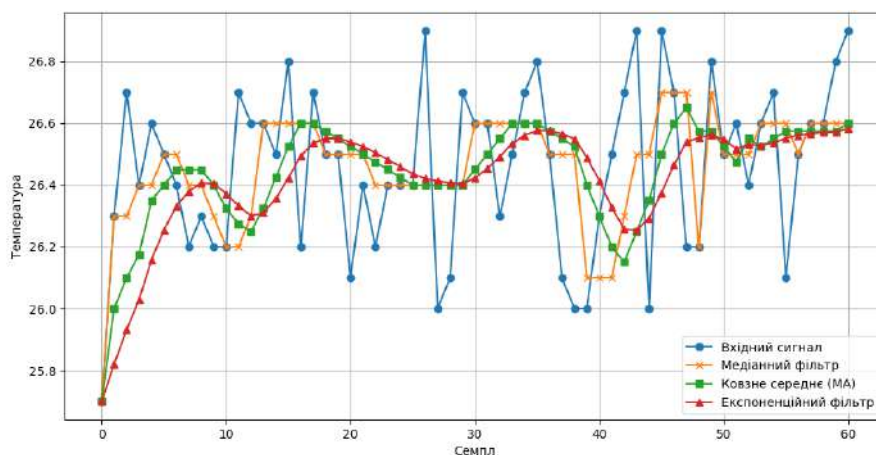


Рис 2. Графіки показників температури під час різних етапів фільтрації

Синя лінія відповідає вхідному сигналу, що складається з реальних вимірювань температури, поданих у модуль фільтрації по одному семплу. На графіку видно, що вхідний сигнал містить численні стрибки (наприклад, на 10–20 та 40–50 семплах), які не відображають реальних змін температури. Помаранчева лінія демонструє результати роботи медіанного фільтра, який усуває раптові імпульси, зберігаючи загальний тренд сигналу. Зелена лінія відображає результат застосування фільтра ковзного середнього, що згладжує залишкові коливання і надає сигналу більш плавний характер. Нарешті, червона лінія показує вихід трирівневого фільтра після експоненційного згладжування, підкреслюючи плавність тренду та забезпечуючи можливість прогнозування подальших значень сигналу.

**Аналіз результатів дослідження.** Реалізація багаторівневої системи фільтрації сенсорних даних платформи FPGA-SoC, що поєднує вбудоване процесорне ядро архітектури ARM Cortex-A9 та програмовну логіку FPGA, дозволяє ефективно розподілити обчислювальні функції між апаратною та програмною частинами системи. FPGA виконує обчислювально інтенсивні операції фільтрації у вигляді паралельної конвеєрної обробки, тоді як вбудоване програмне забезпечення на ARM-процесорі під керуванням ОС Linux забезпечує керування процесом обробки, ініціалізацію апаратних модулів, а також збір і подальшу передачу оброблених даних до системи моніторингу.

Обмін даними між процесором ARM і логікою FPGA здійснюється через внутрішню шину Avalon, що функціонує всередині SoC та не потребує використання зовнішніх інтерфейсів передавання даних (SPI, Ethernet, USB). Це дозволяє мінімізувати накладні витрати на обмін інформацією та забезпечити підвищену пропускну здатність і низьку затримку локального передавання потокових даних.

Реалізація механізмів обміну на рівні модуля ядра ОС Linux додатково зменшує затримки, пов'язані з переходами між просторами користувача та ядра, і надає прямий доступ до регістрів з відображенням у пам'ять та системи обробки апаратних переривань. У сукупності це забезпечує більш детермінований та високопродуктивний обмін даними порівняно з звичайними реалізаціями, що дозволяє розглядати запропоновану архітектуру як орієнтовану на обробку потокових даних у режимі, близькому до реального часу.

Таким чином, поєднання внутрішньої шини Avalon, вбудованого ARM Cortex-A9 та апаратної обробки на FPGA створює умови для реалізації високопродуктивного механізму локальної фільтрації сенсорних потоків на edge-рівні, що забезпечує підвищення продуктивності, зменшення затримок та збереження гнучкості системи.

Попереднє масштабування даних у фіксованому форматі обчислень дозволило знизити витрати апаратних ресурсів та забезпечити стабільність обробки без необхідності використання чисел з плаваючою комою. Експериментальні результати підтвердили, що конвеєрна організація модуля багаторівневої фільтрації забезпечує отримання одного об-

робленого значення на кожному такті після заповнення конвеєра, що значно зменшує загальну затримку системи. Для трьох послідовних етапів фільтрації внутрішня латентність становить лише три такти, а пропускна здатність досягає 1 семпл за такт, що є суттєвою перевагою порівняно з програмною реалізацією на ARM Cortex-A9.

Для програмної реалізації без апаратного прискорення на процесорі ARM Cortex-A9 використана мова програмування C безпосередньо на платформі FPGA-SoC, з використанням компілятора GCC (GNU Compiler Collection) з третім рівнем оптимізації, що забезпечує підвищену швидкість виконання програм. Порівняння програмної реалізації без апаратного прискорення та апаратної реалізації показало, що використання FPGA дозволяє скоротити час обробки на 26%. Отриманий результат є особливо важливим для систем, де частота надходження даних може зростати, а затримка сигналу має залишатися мінімальною. Крім того, експериментально підтверджено покращення якості відфільтрованого сигналу: медіанний фільтр усуває імпульсні сплески, фільтр ковзного середнього згладжує високочастотні коливання, а експоненційне згладжування забезпечує стабільний тренд без втрати реальної динаміки сигналу.

Результати верифікації в середовищі ModelSim підтвердили коректність часових залежностей та безперервність потоків даних на всіх етапах конвеєра. Тестування на апаратному прототипі DE1-SoC засвідчило надійну роботу системи в реальних умовах і продемонструвало її потенціал для застосування в системах автоматизації, моніторингу та інших IoT-рішеннях, де критично важлива швидка та достовірна попередня обробка сенсорних сигналів на edge-рівні.

#### **Висновки.**

1. У роботі розроблено апаратний трирівневий фільтраційний модуль для реалізації системи обробки сенсорних даних у режимі реального часу, що відрізняється від відомих рішень поєднанням медіанного фільтра, ковзного середнього та експоненційного згладжування в єдиному конвеєрі. Така архітектура забезпечує паралельну та прискорену обробку поточкових даних, що підтверджено зменшенням затримки на 26% порівняно з програмною реалізацією на процесорі ARM.

2. Розроблений програмно-апаратний механізм взаємодії процесора ARM та логіки FPGA на SoC через інтерфейс Avalon-MM із використанням фіксованого формату обчислень, що забезпечує низьколатентний та високопродуктивний обмін даними, мінімальні витрати логічних ресурсів FPGA і можливість масштабування системи для обробки мультимедійних потоків без значного збільшення апаратної складності.

3. Експериментальні дослідження підтвердили покращення якості відфільтрованого сигналу: усунення імпульсних шумів, згладжування високочастотних коливань та стабілізацію тренду. Результати демонструють підвищення надійності та точності локальної обробки сенсорних потоків, що робить створений модуль придатним для застосування в розподілених системах моніторингу, промислових IoT-рішеннях та інших реальних задачах edge-обробки даних.

Отримані результати підтверджують наукову новизну роботи: розроблена методика поєднання трирівневої апаратної фільтрації з високошвидкісним інтерфейсом обміну даними на Avalon-MM дозволяє реалізувати детерміновану, масштабовану та ефективну обробку сенсорних потоків на edge-рівні, що суттєво перевищує продуктивність традиційних програмних рішень на вбудованих процесорах.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували модель генеративного штучного інтелекту ChatGPT для пошуку літератури яка відповідає тематиці дослідження та оформлення списку використаних джерел. Після використання ChatGPT автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяв на себе повну відповідальність за зміст публікації.

**Список використаних джерел**

1. Kulanov, V., & Perepelitsyn, A. (2024). Analysis of application of FPGA technologies in IoT. *Aerospace Technic and Technology*, (5), 85–94. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.5.09>.
2. Hryshchuk, O., & Zagorodnyuk, S. (2025). Managing energy consumption in FPGA-based edge computing systems with soft-core CPUs. *Journal of Edge Computing*, 4(1), 57–72. <https://doi.org/10.55056/jec.717>.
3. Kong, L., Tan, J., Huang, J., Chen, G., Wang, S., Jin, X., et al. (2023). Edge-computing-driven Internet of Things: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(8), Article 174, 1–41. <https://doi.org/10.1145/3555308>.
4. Magyari, A., & Chen, Y. (2022). Review of state-of-the-art FPGA applications in IoT networks. *Sensors*, 22, Article 7496. <https://doi.org/10.3390/s22197496>.
5. Satpathy, S., Trivedi, M. C., Malhotra, S., Chaudhary, S., & Sharma, V. (2024). FPGA-enhanced IoT methods for disease pre-screening and prediction: An energy optimization approach. *Measurement: Sensors*, 33, Article 101213. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101213>.
6. Haidai, A., & Klymenko, I. (2025). Methodology of adaptive data processing in IoT monitoring systems with multilevel sensor data filtering and self-tuning. *Information, Computing and Intelligent Systems*, (7), 110–126. <https://doi.org/10.20535/2786-8729.7.2025.341409>.

**References**

1. Kulanov, V., & Perepelitsyn, A. (2024). Analysis of application of FPGA technologies in IoT. *Aerospace Technic and Technology*, (5), 85–94. <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.5.09>.
2. Hryshchuk, O., & Zagorodnyuk, S. (2025). Managing energy consumption in FPGA-based edge computing systems with soft-core CPUs. *Journal of Edge Computing*, 4(1), 57–72. <https://doi.org/10.55056/jec.717>.
3. Kong, L., Tan, J., Huang, J., Chen, G., Wang, S., Jin, X., et al. (2023). Edge-computing-driven Internet of Things: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(8), Article 174, 1–41. <https://doi.org/10.1145/3555308>.
4. Magyari, A., & Chen, Y. (2022). Review of state-of-the-art FPGA applications in IoT networks. *Sensors*, 22, Article 7496. <https://doi.org/10.3390/s22197496>.
5. Satpathy, S., Trivedi, M. C., Malhotra, S., Chaudhary, S., & Sharma, V. (2024). FPGA-enhanced IoT methods for disease pre-screening and prediction: An energy optimization approach. *Measurement: Sensors*, 33, Article 101213. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101213>.
6. Haidai, A., & Klymenko, I. (2025). Methodology of adaptive data processing in IoT monitoring systems with multilevel sensor data filtering and self-tuning. *Information, Computing and Intelligent Systems*, (7), 110–126. <https://doi.org/10.20535/2786-8729.7.2025.341409>.

Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.12.2025

UDC 004.6:004.75:004.382

**Anatolii Haidai<sup>1</sup>, Iryna Klymenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [tolya.hei@gmail.com](mailto:tolya.hei@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9330-414X>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Computing Engineering  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)  
E-mail: [klymenko.iryana@lil.kpi.ua](mailto:klymenko.iryana@lil.kpi.ua). ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5345-8806>

**HIGH-PERFORMANCE HARDWARE-SOFTWARE SYSTEM  
FOR EDGE PROCESSING OF SENSOR DATA STREAMS IN IoT SYSTEMS  
ON AN FPGA-SoC PLATFORM**

*The paper addresses the development and implementation of a high-performance hardware–software system for multi-level filtering of sensor measurements on an FPGA-SoC platform with an integrated ARM processor running the Linux operating system. The aim of the study is to ensure parallel processing of streaming sensor data at the edge level of IoT systems with minimal and deterministic latency, reduced network load, and improved scalability for multi-channel data streams.*

*To achieve this goal, a hardware filtering module was implemented as a three-stage pipelined architecture combining a median filter, a moving average filter, and exponential smoothing. A hardware–software interaction mechanism between the*

*embedded ARM processor and FPGA logic was implemented using the Avalon-MM interface, which provides high-performance exchange and processing of streaming sensor data in real time using fixed-point representation.*

*Experimental results show that the hardware implementation of multilevel sensor stream filtering on FPGA produces one processed sample per clock cycle after pipeline filling, with an internal latency of three clock cycles and a throughput of one sample per cycle. A comparison with a software implementation on an ARM Cortex-A9 processor demonstrates a 26% reduction in processing time. The experiments also confirm improved signal quality through suppression of impulse noise, smoothing of high-frequency fluctuations, and stabilization of the signal trend without loss of useful signal dynamics.*

*The developed sensor stream processing system, based on the combination of three-level hardware filtering on an FPGA-SoC platform and a high-speed Avalon-MM interface, provides deterministic, scalable, and efficient local edge-level data processing, significantly outperforming traditional software-based solutions on ARM processors. The proposed approach is suitable for distributed monitoring systems, industrial IoT applications, and other real-time scenarios where high performance and predictable timing characteristics are critical.*

**Keywords:** *FPGA; data filtering; ARM; IoT.*

*Fig.: 2. References: 6.*

**Павло Володимирович Зінченко<sup>1</sup>, Дмитро Борисович Мехед<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

Email: [zinchenkop@protonmail.com](mailto:zinchenkop@protonmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-6463>. ResearcherID: MDS-7976-2025

<sup>2</sup>кандидат педагогічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та математичного моделювання

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

Email: [d.mekhed@gmail.com](mailto:d.mekhed@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-3620>

ResearcherID: H-1751-2016. SCOPUS Author ID: 57193823626

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ АВТОМАТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МУЛЬТИРЕГІОНАЛЬНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті представлено інформаційну технологію динамічної оптимізації мультирегіональних хмарних розгортань, що ґрунтується на комплексному врахуванні експлуатаційних метрик затримки доступу та регіональної вартості обчислювальних ресурсів. Метою роботи є підвищення ефективності хмарних розгортань за рахунок автоматизованого вибору регіонів з урахуванням реального географічного розподілу користувачів і чинних тарифів хмарного провайдера. Запропоновано формальну модель, у якій ефективна затримка визначається як зважене мінімальне значення для кожної групи користувачів, а сумарна вартість — як агрегована вартість активних регіонів. На основі інтегрального критерію якості сформовано механізм прийняття рішень, який реалізовано у вигляді програмного агента. Агент здійснює автоматизований збір експлуатаційних метрик CDN і хмарних даних за ціною, оцінює поточний стан системи та ініціює зміну конфігурації за допомогою засобів інфраструктури як коду. Наведено кількісний приклад, що демонструє потенційне зменшення середньої ефективної затримки до 40 % та потенційну економію витрат до 2800 доларів США на рік за умови коректно підбраної мультирегіональної конфігурації. Отримані результати підтверджують доцільність використання динамічної оптимізації для підвищення продуктивності та економічної ефективності хмарних систем.

**Ключові слова:** оптимізація; моніторинг; затримка; Cloudflare; AWS; інформаційна технологія; інфраструктура як код; Python; агент.

Рис.: 1. Бібл.: 20.

**Актуальність теми дослідження.** Стрімке зростання глобальних вебсервісів призводить до того, що все більше застосунків одночасно обслуговують користувачів із кількох континентів. За таких умов ключовими стають два взаємопов'язані аспекти: затримка доступу до серверної інфраструктури та економічна доцільність вибору регіону її розгортання. Відомо, що різниця у вартості однакових інстансів хмарного провайдера в різних регіонах може становити десятки відсотків, а інколи й перевищувати двократне значення [1]. Водночас реальна затримка між користувачем і дата-центром здатна різко змінюватися залежно від географічного розподілу трафіку, часу доби та завантаженості мережевих маршрутів.

Сучасні CDN-платформи надають деталізовані експлуатаційні метрики, які відображають справжню географію користувачів. Хмарні провайдери, у свою чергу, відкривають API для отримання актуальних цін на інфраструктурні ресурси [2–4]. Попри це, більшість сервісів продовжують працювати з фіксованою регіональною конфігурацією, не використовуючи можливість адаптивної перебудови архітектури у відповідь на зміни в поведінці трафіку або вартості ресурсів.

У таких умовах актуальною стає розробка технології, здатної автоматично інтегрувати дані про затримку й вартість у єдиний механізм оптимізації мультирегіональних розгортань, що й становить предмет цього дослідження.

**Постановка проблеми.** Проблема полягає у відсутності практичного інструменту, який міг би динамічно визначати оптимальне розташування хмарної інфраструктури на основі реальних експлуатаційних метрик. У сучасних системах вибір регіону зазвичай здійснюється разово – на етапі проектування – і рідко змінюється надалі. Такий статичний підхід призводить або до надмірних витрат, коли сервіс працює у дорогому регіоні без потреби, або до підвищеної затримки, коли інфраструктура розташована далеко від фактичних точок доступу.

Навіть коли адміністратори мають доступ до CDN-аналітики та до інструментів моніторингу вартості, вони переважно аналізують такі дані вручну. Крім того, відсутній формальний механізм, який би дозволяв інтегрувати метрики про затримку, регіональні тарифи та параметри міграції інфраструктури у цілісну модель прийняття рішень. У результаті регіональні зміни або не виконуються взагалі, або проводяться епізодично та без гарантій оптимальності.

Проблема ускладнюється тим, що зміна регіону – це не лише вибір місця, але й динамічний перехід, що має власну вартість і ризики. Отже, виникає потреба в технології, здатній не лише оцінити стан системи, а й автоматично адаптувати інфраструктуру на основі формальної моделі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У науковій літературі широко обговорюються методи оптимізації розміщення сервісів у хмарних, fog-орієнтованих та edge-орієнтованих середовищах [5–10]. Числові моделі, що використовують багатокритеріальну оптимізацію, пропонують враховувати затримку, навантаження на вузли, енергоспоживання та інші параметри [5–9; 13; 14]. Однак такі дослідження здебільшого виконані у симуляційних умовах і не залучають реальних експлуатаційних метрик CDN або даних про актуальні ціни хмарних провайдерів. Отже, вони слабо застосовні до реальних систем, у яких інтенсивність трафіку й географія користувачів змінюються динамічно.

Практичні рекомендації хмарних провайдерів зосереджені переважно на статичному виборі регіону: мінімізація затримки, відповідність регуляціям, доступність сервісів та вартість [1; 11]. Проте жоден з цих підходів не пропонує механізмів, які дозволяють змінювати конфігурацію інфраструктури у процесі експлуатації. FinOps-підходи, хоча й приділяють значну увагу оптимізації вартості, фокусуються здебільшого на внутрішньо-регіональних змінах (типи інстансів, резервування, Spot-моделі), а не на динамічному виборі регіону [12].

Що стосується CDN-аналітики, то хоча платформи на кшталт Cloudflare надають деталізовані метрики затримки, ці дані найчастіше використовуються для побудови дашбордів, а не у складі інтегрованої технології автоматичного прийняття рішень [3; 4]. Таким чином, у наявних дослідженнях бракує рішень, які б об'єднували метрики затримки та ціни у єдиний механізм оптимізації, здатний працювати у реальних експлуатаційних умовах.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри активний розвиток методів оптимізації розміщення сервісів у хмарних та edge-орієнтованих інфраструктурах, важлива частина проблеми залишається нерозкритою — а саме, використання реальних експлуатаційних метрик для динамічного керування мультирегіональними розгортаннями [5–8; 13; 14]. Більшість існуючих підходів ґрунтуються або на аналітичних моделях у симуляційному середовищі, або на узагальнених рекомендаціях хмарних провайдерів щодо вибору регіону. Такі моделі не враховують фактичної географії трафіку, реальних показників затримки та актуальної вартості ресурсів у кожному регіоні — параметрів, які суттєво змінюються залежно від часу доби, континенту чи змін у поведінці користувачів.

Недостатньо дослідженою залишається й інтеграція CDN-аналітики, зокрема метрик Cloudflare, із механізмами автоматичного керування хмарною інфраструктурою [3,4]. Хоча CDN-провайдери надають високоточні вимірювання затримки та детальний розподіл запитів за географією, ці дані майже не застосовуються у процесі автоматичного вибору або корекції регіонів розгортання. У наявних роботах не розглядається можливість поєднання таких метрик у формальну модель, здатну оцінювати ефективну затримку для всієї системи загалом.

Окремою прогалиною є недостатня увага до економічних аспектів, пов'язаних із динамічним перемиканням між регіонами. Питання вартості міграції, міжрегіонального трафіку, збільшення обчислювального навантаження під час масштабування або згортання інфраструктури – у більшості досліджень або ігноруються, або враховуються дуже



приблизно [15–18]. Це створює різницю невідповідності між теоретичними моделями та реальними умовами роботи хмарних сервісів.

Не менш важливим є те, що в літературі фактично відсутні рішення, які пропонують завершений технологічний цикл: від збору даних до автоматизованої зміни конфігурації засобами інфраструктури як коду. Більшість публікацій зосереджуються на математичних моделях оптимізації або окремих рекомендаціях FinOps-підходів, але майже не торкаються питання реалізації програмного агента, здатного працювати в реальних умовах і адаптувати архітектуру системи відповідно до змін у трафіку та вартості ресурсів.

Таким чином, основним недослідженим напрямом залишається створення інтегрованої технології, яка поєднує метрики CDN, регіональні прайсинг-дані та механізми автоматичного розгортання в одну цілісну модель ухвалення рішень. Саме ця прогалина й визначає актуальність розроблення підходу, який буде представлений у подальших розділах статті.

**Мета статті.** Метою статті є розроблення та обґрунтування інформаційної технології динамічної оптимізації мультирегіональних хмарних розгортань, яка враховує одночасно метрики затримки, географічний профіль користувачів і реальні регіональні витрати на інфраструктуру. У межах цієї мети передбачається створити формальну математичну модель для обчислення ефективної затримки та сумарної вартості конфігурації, визначити інтегральну функцію якості, що поєднує обидва критерії, та запропонувати механізм вибору оптимального набору регіонів залежно від їхнього внеску в загальну продуктивність і фінансові показники.

Додатковою частиною мети є побудова архітектури програмного агента, який автоматично збирає експлуатаційні метрики з CDN та хмари, оцінює поточну конфігурацію за розробленою моделлю, генерує альтернативи й може ініціювати відповідні зміни за допомогою засобів інфраструктури як коду. Запропонований підхід має продемонструвати, що інтеграція метрик затримки та ціни дозволяє адаптивно керувати мультирегіональною інфраструктурою, покращуючи співвідношення швидкодії та витрат у порівнянні з традиційними статичними підходами.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована інформаційна технологія базується на ідеї замкненого контуру керування конфігурацією мультирегіональної інфраструктури. У цьому контурі агент:

- безперервно збирає метрики трафіку та затримки з рівня CDN (Cloudflare) і дані про вартість ресурсів у різних регіонах хмарного провайдера [2–4];
- на основі цих даних оцінює поточну конфігурацію розгортання та обирає найбільш доцільний варіант з огляду на компроміс між затримкою та вартістю;
- генерує альтернативні варіанти (наприклад, додати новий регіон, вимкнути частину інфраструктури);
- за потреби автоматично застосовує зміни до інфраструктури за допомогою засобів інфраструктури як коду (Pulumi тощо).

**Модель роботи агента.** На рівні збору даних агент підключається до Cloudflare API та отримує статистику за країнами, регіонами та дата-центрами: кількість запитів, частку трафіку, показники затримки (наприклад, медіану або 95-й перцентиль). Cloudflare Web Analytics дають такі дані з досить високою деталізацією в розрізі регіонів і періодів часу [3; 4].

Паралельно агент використовує AWS Price List API або зовнішні агрегатори цін (наприклад, cloudprice.net, aws-pricing.com) для отримання актуальної вартості інстансів вибраного типу в кожному регіоні [2; 19]. Для інстансу t4g.medium (2 vCPU, 4 GiB RAM) агреговані дані показують, що мінімальна ціна on-demand становить близько 0,0224 \$/год, середня – приблизно 0,0388 \$/год, максимальна – до 0,0536 \$/год. У перерахунку на місяць (24 год × 30 днів) це дає від  $\approx 16,3$  \$/міс до  $\approx 39$  \$/міс, причому реальні сервіси для порівняння інстансів вказують для t4g.medium типові значення на рівні  $\approx 16,35$  \$/міс у найдешевших регіонах і  $\approx 28,2$  \$/міс як близьке до середнього значення [2; 19].



Отримані дані проєктуються на модель, де:

- кожен регіон AWS описується оцінкою вартості  $C(r)$  для заданого обсягу ресурсів (наприклад, один або  $N$  інстансів t4g.medium) та профілем затримки до основних груп користувачів;

- кожна група користувачів (країна або сукупність країн) характеризується часткою трафіку  $pu$  та виміряною або оціненою затримкою  $L(r,u)$  до кожного регіону  $r$ .

Для заданої множини активних регіонів  $S$  агент обчислює середню ефективну затримку як середнє по всіх групах користувачів:

$$Leff(S) = \sum_u pu \min_{r \in S} L(r,u),$$

а сумарну вартість конфігурації – як суму вартостей усіх активних регіонів:

$$C_{tot}(S) = \sum_{r \in S} C(r).$$

Таким чином, кожна конфігурація  $S$  описується парою  $Leff(S), C_{tot}(S)$ . Далі агент порівнює поточну конфігурацію з альтернативними: наприклад, добудувати другий регіон поблизу нового кластера користувачів; навпаки, відмовитися від регіону, який істотно збільшує витрати, але майже не покращує затримку; перенести основне навантаження в дешевший регіон за умови, що середня затримка залишиться в допустимих межах.

Щоб уникнути «миготіння» між регіонами, використовується гістерезис: конфігурація змінюється лише тоді, коли очікуване покращення (наприклад, зниження  $Leff(S)$  або  $C_{tot}(S)$ ) перевищує наперед заданий поріг, а також коли виконується перевірка на окупність з урахуванням вартості міграції. Практичні матеріали з AWS наголошують, що міжрегіональний трафік і операції реплікації можуть суттєво збільшувати рахунок, тому ці витрати мають явно враховуватися агентом [1; 11].

На рівні виконання зміни здійснюються через Pulumi (або інші IaC-інструменти), які дозволяють програмно описати EC2-інстанси, VPC, балансувальники, а також інтеграцію з Cloudflare. Такий підхід узгоджується з сучасними DevOps- та FinOps-практиками, де інфраструктура описується як код і може модифікуватися автоматизовано на основі зовнішніх сигналів [12].

**Архітектура агента.** З огляду на те що, агент має три основні функції: збір статистики, аналіз та застосування змін, то доцільно розбити архітектуру агента на три основні функціональні блоки. Перелік функціональних блоків для кожної із функцій:

- Collector – збір статистики та конвертація її у зручний формат для застосування розробленої моделі;

- Analazyer – використовуючи розроблену модель із врахуванням конфігурації сервісу знаходження оптимальної мультирегіональної конфігурації інфраструктури;

- Deployer – пропозиція змін на основі шаблону, розгортання запропонованих змін та оновлення поточного стану;

Крім функціональних блоків, потрібно визначити, яким чином будуть задаватися параметри агента, адже агент повинен розуміти, яку статистику збирати, а також розуміти яку інфраструктуру розгортувати в додатковому регіоні. Тож, для роботи цих функціональних блоків на вході агент отримує 2 блоки налаштувань та 2 блоки опису IaC ресурсів:

- конфігурація агента – як часто виконувати оптимізацію, налаштування посилань на API для збору статистики, налаштування логування та інші налаштування, що стосуються здебільшого роботи самого агента, а не бізнес-логіки;

- конфігурація сервісу для моніторингу та оптимізації - як отримати статистику саме для потрібного сервісу, поріг допустимої затримки, мінімальне покращення для застосування;

- опис шаблону ресурсів для розгортання в межах регіону – опис ресурсів котрі потрібно розгорнути в межах нового регіону;
- опис поточного стану ресурсів до та після оптимізації – опис поточного стану ресурсів для визначення стану розгорнутих регіонів та ресурсів для них.

Першим функціональним блоком виступає Collector, який збирає статистику про стан сервісу – затримку та витрати на нього. Збір статистики виконується за допомогою API Cloudflare або AWS для AWS Cloudfront, посилання на які вказані в загальному конфігураційному файлі, де також визначено частота отримання статистики. Агент збирає статистичні дані тільки для заданого фільтра, який визначений у конфігурації для сервісу. Отримані дані статистики формуються у зручний формат для аналізу й передаються до блоку Analyzer.

Функціональний блок Analyzer на основі статистики та заданих параметрів в конфігурації сервісів (таких як поріг допустимої затримки та мінімальне покращення для застосування), виконує оптимізацію, тобто визначає доцільність змін у регіональному розміщенні: наприклад, додати регіон зі зростанням трафіку, прибрати регіон із низькою завантаженістю.

Після ухвалення оптимізаційних рішень блок Deployer формує зміни та застосовує їх. Він порівнює перевіряє розгорнуті регіони й у разі потреби виконує розгортання змін: додавання або видалення регіону. На виході оновлена інфраструктура фіксується в актуальному окремому IaC стані, забезпечуючи прозорий цикл змін і можливість подальшого контролю, а також перезапуск програмного агента без втрати стану сервісу.

Описану архітектуру можна побачити на рис. 1.

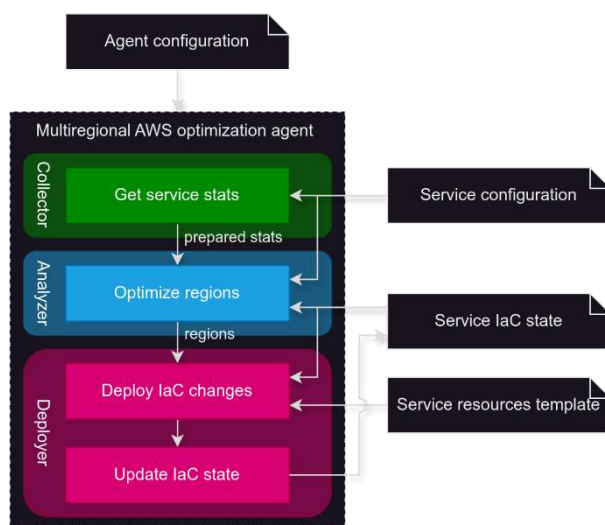


Рис. 1. Архітектура програмного агента

Реалізація програмного агента виконана мовою програмування Python. Для реалізації описаної архітектури програмного агента були написані такі функції:

- `init_logger()` - ініціалізація об'єктів для логування і подальше використання їх у всій програмі;
- `init_settings()` - ініціалізація налаштувань самого агента й подальше використання завантажених параметрів із оточення;
- `init_configuration()` - завантаження конфігурації сервісу;
- `init_pulumi_state()` - ініціалізація пустого стейту `pulumi` та імпортування вже існуючої попередньо експортованого стейту сервісу;

- `get_instances_price()` - отримання цін на інстанси для подальшого розрахунку ефективності розгортання регіонів;
- `make_cloudflare_request()` - формування та пейджинг прямих запитів до Cloudflare GraphQL API;
- `make_cloudprice_request()` - формування прямих запитів до CloudPrice API щодо цін на інстанси;
- `get_raw_stats()` - отримання непідготовленої статистики використання сервісу;
- `prepare_stats(raw_stats: dict)` - формування непідготовленої статистики у зручний для аналізу формат;
- `get_service_usage()` - отримати підготовлену статистику для сервісу;
- `get_regions_from_state()` - отримати поточний список регіонів для подальшої оптимізації;
- `optimize_regions(stats: dict)` - оптимізація регіонів за допомогою моделі: визначення списку актуальних регіонів;
- `deploy_changes(regions: list)` - розгорнути актуальний список регіонів, інші регіони видалити;
- `update_resources_state()` - оновити окремий спеціальний стейт для візуалізації для ops команд;
- `main()` - основний цикл роботи агенту.

**Кількісний приклад оцінки ефективності.** Щоб продемонструвати ефективність підходу, розглянемо спрощений, але чисельно конкретний сценарій. Нехай вебзастосунок обслуговує користувачів з Європи та Південної Азії. За даними Cloudflare аналітики, у середньому 70 % запитів надходить із країн ЄС і Великої Британії, а 30 % – з Індії та сусідніх країн [3; 4].

Для інфраструктури використовується інстанс типу `t4g.medium`. Згідно з агрегованими даними по регіонах, найдешевші регіони пропонують орієнтовно  $\approx 16,35$  \$/міс за один `t4g.medium`, тоді як більш «типові» європейські регіони дають значення на рівні близько 28 \$/міс [2; 19].

Для оцінки затримки скористаємося публічними таблицями RTT між регіонами та континентами, які показують, що [20]:

- затримка всередині Європи (користувачі в ЄС  $\rightarrow$  регіон `eu-central-1, Frankfurt`) зазвичай знаходиться в діапазоні 30-60 мс;
- затримка між Західною Європою та Південною Азією (наприклад, до регіону `ap-south-1, Mumbai`) може сягати 170-220 мс;
- у зворотному напрямку (користувачі в Індії  $\rightarrow$  регіон у Європі) спостерігаються подібні величини, тоді як до найближчого регіону в Азії затримка знижується до 50–70 мс.

Розглянемо три варіанти конфігурації.

**Варіант А (один європейський регіон).** Застосунок розгорнуто лише в регіоні `eu-central-1 (Frankfurt)`, вартість одного `t4g.medium` — приблизно 28 \$/міс. Для оцінки візьмемо такі усереднені значення:

- для європейських користувачів – 50 мс до Frankfurt;
- для користувачів з Південної Азії – 180 мс до Frankfurt.

Тоді середня ефективна затримка становитиме:

$$L_{eff}(A) = 0,7 \cdot 50 + 0,3 \cdot 180 \approx 35 + 54 = 89 \text{ ms.}$$

Сумарна вартість:

$$C_{tot}(A) \approx 28 \text{ dollars/month.}$$

**Варіант В (один азійський регіон).** Розгортаємо застосунок лише в регіоні ap-south-1 (Mumbai). За даними агрегаторів цін, для цього регіону t4g.medium знаходиться ближче до мінімальної межі, тобто  $\approx 16,5$  \$/міс [2; 19]. Припустимо:

- для користувачів у Європі –  $\approx 200$  мс до Mumbai;
- для користувачів Південної Азії – 60 мс.

Тоді:

$$L_{\text{eff}}(B) = 0,7 \cdot 200 + 0,3 \cdot 60 = 140 + 18 = 158 \text{ ms}, C_{\text{tot}}(B) \approx 16,5 \text{ dollars/month.}$$

Отже, порівняно з варіантом А, вартість знижується майже на 40 %, але середня затримка зростає майже вдвічі. Для інтерактивних сервісів це, як правило, неприйнятно.

**Варіант С (два регіони, Європа + Південна Азія).** Розгортаємо по одному t4g.medium у Frankfurt і Mumbai, а Cloudflare Load Balancer розподіляє трафік за географічним принципом: європейські користувачі обслуговуються з європейського регіону, азійські — з ap-south-1 [3; 4]. Вартість:

$$C_{\text{tot}}(C) \approx 28 + 16,5 = 44,5 \text{ dollars/month.}$$

Для затримки:

- Європа  $\rightarrow$  Frankfurt: 50 мс;
- Південна Азія  $\rightarrow$  Mumbai: 60 мс.

Середня ефективна затримка:

$$L_{\text{eff}}(C) = 0,7 \cdot 50 + 0,3 \cdot 60 = 35 + 18 = 53 \text{ ms.}$$

Якщо порівняти варіанти:

- перехід від А до С зменшує середню затримку приблизно з 89 мс до 53 мс (близько – 40 %), але збільшує вартість у 1,6 раза (з 28 \$/міс до 44,5 \$/міс);
- перехід від В до С підвищує вартість (з 16,5 \$/міс до 44,5 \$/міс), але зменшує середню затримку зі 158 мс до 53 мс (понад утричі).

У реальній системі вибір між цими сценаріями залежатиме від допустимих рівнів затримки та бюджету. Запропонована технологія дозволяє формалізувати це як задачу мінімізації деякої інтегральної функції якості  $F(S)$ , наприклад:

$$F(S) = \alpha \cdot L_{\text{eff}}(S) + \beta \cdot C_{\text{tot}}(S),$$

де коефіцієнти  $\alpha$  і  $\beta$  відображають пріоритети системи: чутливість до затримки і до вартості. Якщо, наприклад, сервіс належить до класу, де мінімізація затримки критична (онлайн-ігри, біржові системи), ваговий коефіцієнт при  $L_{\text{eff}}$  буде високим, і агент віддасть перевагу конфігурації С. Для менш чутливих до часу відгуку бізнес-застосунків із жорстким бюджетом може бути обрано варіант А або навіть В.

На горизонті року різниця у вартості стає відчутнішою. Один інстанс t4g.medium, запущений у середньодорогому регіоні ( $\approx 28$  \$/міс), обійдеться приблизно в 336 \$/рік, тоді як у дешевшому регіоні ( $\approx 16,5$  \$/міс) — близько 198 \$/рік. Для кластера з 20 інстансів потенційна економія може сягати  $\sim 2800$  \$/рік, якщо агент виявить сценарії, де перехід у дешевший регіон не призводить до критичного зростання затримки. Такі розрахунки добре узгоджуються з оцінками FinOps-практиків щодо впливу вибору регіону на річний бюджет [12].

Отже, навіть у простому прикладі видно, що поєднання метрик затримки та вартості дає змогу виявити конфігурації, які суттєво покращують один із показників за прийнятного зростання іншого. Запропонований агент формалізує цей процес, автоматизує збір і аналіз даних та, на відміну від ручного налаштування, здатний реагувати на зміни географії трафіка протягом експлуатації системи, а не лише на етапі початкового проектування.

**Висновки.** У роботі запропоновано інформаційну технологію, яка дозволяє динамічно оптимізувати мультирегіональні хмарні розгортання на основі поєднання метрик затримки

та регіональної вартості ресурсів. На відміну від статичних архітектурних підходів, запропонована технологія інтегрує реальні експлуатаційні дані CDN, дані хмарних прайсінг-АРІ та формальну модель оцінки конфігурацій, що включає середню ефективну затримку, загальну вартість та інтегральний критерій якості. Застосування такої моделі у складі програмного агента дає можливість не лише аналізувати поточний стан системи, але й ініціювати автоматизовану зміну регіонів розгортання через засоби інфраструктури як коду.

Кількісний приклад, наведений у статті, демонструє, що навіть у простих сценаріях поєднання двох регіонів може суттєво знизити середню затримку для глобальної аудиторії, тоді як перехід у дешевші регіони — забезпечити відчутну економію при збереженні прийняттого рівня продуктивності. Це підтверджує доцільність застосування розробленої технології в умовах змінної географії трафіку та високої варіативності регіональної вартості хмарних ресурсів.

Своєю чергою варто зазначити, що запропонований підхід є доволі декларативним на рівні описаних ресурсів для сервісу в шаблоні, хоча на рівні регіонів підхід дозволяє динамічно виконувати оптимізацію розгорнутої інфраструктури.

Окремим мінусом інформаційної технології в поточній реалізації є те, що її складно застосувати із сервісами котрі мають зберігати стан, наприклад, у кластерних базах даних.

Отримані результати свідчать, що перехід від статичного до адаптивного керування мультирегіональною інфраструктурою є ефективним шляхом підвищення якості обслуговування та зменшення експлуатаційних витрат. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі прогностичними механізмами та застосуванням методів машинного навчання для передбачення трафіку й автоматичного формування оптимальних конфігурацій, незважаючи на сервіси зі збереженим станом чи ні.

### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.**

Під час написання цієї статті автори використовували ChatGPT для упорядкування думок стосовно постановки проблеми, пошуку та аналізу схожих наукових робіт і з метою усунення стилістичних та граматичних помилок. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### **Список використаних джерел**

1. Amazon Web Services. (2022). *COST07-BP02 Choose regions based on cost*. AWS Well-Architected Framework Documentation. [https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/cost-optimization-pillar/cost\\_pricing\\_model\\_region\\_cost.html](https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/cost-optimization-pillar/cost_pricing_model_region_cost.html).
2. Amazon Web Services. (2024). *AWS Price List Service and Price List API documentation*. <https://docs.aws.amazon.com/awsaccountbilling/latest/aboutv2/bulk-api-reading-price-list-files.html>.
3. Cloudflare. (2024). *Load Balancing and Load Balancing Analytics documentation*. <https://developers.cloudflare.com/load-balancing/reference/load-balancing-analytics/>.
4. Cloudflare. (2024). *Web Analytics documentation*. <https://developers.cloudflare.com/web-analytics/>.
5. Aslanpour, M. S., Gill, S. S., & Toosi, A. N. (2020). Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research. *Internet of Things*, 12, 100273.
6. Taleb, I., Guillaume, J.-L., & Duthil, B. (2025). A survey on services placement algorithms in integrated cloud–fog/edge computing. *ACM Computing Surveys*, 57(11), Article 268.
7. Apat, H. K., Sahoo, B., Maiti, P., Barik, R. K., & Saikia, M. J. (2025). Fog service placement optimization: A survey of state-of-the-art strategies and techniques. *Computers*, 14(3), 99.
8. Supraja, T., Chawla, P., & Gill, S. S. (2025). AI-driven service placement in fog and edge computing environments: A systematic review, taxonomy and future directions. *Cluster Computing*, 28, 1070.
9. Velasquez, K., Perez Abreu, D., Curado, M., & Monteiro, E. (2021). Service placement for latency reduction in the fog using application profiles. *IEEE Access*, 9, 80821–80834.

10. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2018). A lightweight decentralized service placement policy for performance optimization in fog computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(5), 1467–1482.
11. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2019). Evaluation and efficiency comparison of evolutionary algorithms for service placement optimization in fog architectures. *Future Generation Computer Systems*, 97, 131–144.
12. Ghobaei-Arani, M., & Shahidinejad, A. (2022). A cost-efficient IoT service placement approach using whale optimization algorithm in fog computing environment. *Expert Systems with Applications*, 200, 117012.
13. Chikhaoui, A., Lemarchand, L., Boukhalfa, K., & Boukhobza, J. (2021). Multi-objective optimization of data placement in a Storage-as-a-Service federated cloud. *ACM Transactions on Storage*, 17(3), Article 22.
14. Liu, X., Fan, L., Wang, L., et al. (2016). Multiobjective reliable cloud storage with its particle swarm optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 9529526.
15. Adhikari, M., Mukherjee, M., & Srirama, S. N. (2020). DPTO: A deadline and priority-aware task offloading in fog computing framework leveraging multilevel feedback queueing. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 5773–5782.
16. Boubaker, N. E. H., Zarour, K., Guermouche, N., & Benmerzoug, D. (2022). Fog and edge service migration approaches based on machine learning techniques. In *Proceedings of the Tunisian–Algerian Conference on Applied Computing (TACC)* (pp. 33–44). CEUR Workshop Proceedings, 3333.
17. Amazon Web Services. (2021). *What to consider when selecting a region for your workloads*. AWS Architecture Blog. <https://aws.amazon.com/blogs/architecture/what-to-consider-when-selecting-a-region-for-your-workloads/>.
18. FinOps Foundation. (2023). *Managing cloud cost anomalies and related FinOps capabilities*. <https://www.finops.org/wg/managing-cloud-cost-anomalies/>.
19. Cloudprice.net. (2025). *t4g.medium specs and pricing | AWS*. <https://cloudprice.net/>.
20. Bichard, L. (2021). How to find which AWS region is closest to you? *DEV Community*. <https://dev.to/loujaybee/how-to-find-which-aws-region-is-closest-to-you-3k38>.

## References

1. Amazon Web Services. (2022). *COST07-BP02 Choose regions based on cost*. AWS Well-Architected Framework Documentation. [https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/cost-optimization-pillar/cost\\_pricing\\_model\\_region\\_cost.html](https://docs.aws.amazon.com/wellarchitected/latest/cost-optimization-pillar/cost_pricing_model_region_cost.html).
2. Amazon Web Services. (2024). *AWS Price List Service and Price List API documentation*. <https://docs.aws.amazon.com/awsaccountbilling/latest/aboutv2/bulk-api-reading-price-list-files.html>.
3. Cloudflare. (2024). *Load Balancing and Load Balancing Analytics documentation*. <https://developers.cloudflare.com/load-balancing/reference/load-balancing-analytics/>.
4. Cloudflare. (2024). *Web Analytics documentation*. <https://developers.cloudflare.com/web-analytics/>.
5. Aslanpour, M. S., Gill, S. S., & Toosi, A. N. (2020). Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research. *Internet of Things*, 12, 100273.
6. Taleb, I., Guillaume, J.-L., & Duthil, B. (2025). A survey on services placement algorithms in integrated cloud–fog/edge computing. *ACM Computing Surveys*, 57(11), Article 268.
7. Apat, H. K., Sahoo, B., Maiti, P., Barik, R. K., & Saikia, M. J. (2025). Fog service placement optimization: A survey of state-of-the-art strategies and techniques. *Computers*, 14(3), 99.
8. Supraja, T., Chawla, P., & Gill, S. S. (2025). AI-driven service placement in fog and edge computing environments: A systematic review, taxonomy and future directions. *Cluster Computing*, 28, 1070.
9. Velasquez, K., Perez Abreu, D., Curado, M., & Monteiro, E. (2021). Service placement for latency reduction in the fog using application profiles. *IEEE Access*, 9, 80821–80834.
10. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2018). A lightweight decentralized service placement policy for performance optimization in fog computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(5), 1467–1482.
11. Guerrero, C., Lera, I., & Juiz, C. (2019). Evaluation and efficiency comparison of evolutionary algorithms for service placement optimization in fog architectures. *Future Generation Computer Systems*, 97, 131–144.

12. Ghobaei-Arani, M., & Shahidinejad, A. (2022). A cost-efficient IoT service placement approach using whale optimization algorithm in fog computing environment. *Expert Systems with Applications*, 200, 117012.
13. Chikhaoui, A., Lemarchand, L., Boukhalfa, K., & Boukhobza, J. (2021). Multi-objective optimization of data placement in a Storage-as-a-Service federated cloud. *ACM Transactions on Storage*, 17(3), Article 22.
14. Liu, X., Fan, L., Wang, L., et al. (2016). Multiobjective reliable cloud storage with its particle swarm optimization algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 9529526.
15. Adhikari, M., Mukherjee, M., & Srirama, S. N. (2020). DPTO: A deadline and priority-aware task offloading in fog computing framework leveraging multilevel feedback queueing. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 5773–5782.
16. Boubaker, N. E. H., Zarour, K., Guermouche, N., & Benmerzoug, D. (2022). Fog and edge service migration approaches based on machine learning techniques. In *Proceedings of the Tunisian–Algerian Conference on Applied Computing (TACC)* (pp. 33–44). CEUR Workshop Proceedings, 3333.
17. Amazon Web Services. (2021). *What to consider when selecting a region for your workloads*. AWS Architecture Blog. <https://aws.amazon.com/blogs/architecture/what-to-consider-when-selecting-a-region-for-your-workloads/>.
18. FinOps Foundation. (2023). *Managing cloud cost anomalies and related FinOps capabilities*. <https://www.finops.org/wg/managing-cloud-cost-anomalies/>.
19. Cloudprice.net. (2025). *t4g.medium specs and pricing | AWS*. <https://cloudprice.net/>.
20. Bichard, L. (2021). How to find which AWS region is closest to you? *DEV Community*. <https://dev.to/loujaybee/how-to-find-which-aws-region-is-closest-to-you-3k38>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.12.2025

UDC 004

**Zinchenko Pavlo Volodymyrovych<sup>1</sup>, Mekhed Dmytro Borysovysh<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student at the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

Email: [zinchenkop@protonmail.com](mailto:zinchenkop@protonmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-6463>. ResearcherID: MDS-7976-2025

<sup>2</sup>PhD in Pedagogy, Associate Professor of the Department of cybersecurity and mathematical simulation  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

Email: [d.mekhed@gmail.com](mailto:d.mekhed@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3905-3620>  
ResearcherID: H-1751-2016. SCOPUS Author ID: 57193823626

## INFORMATION TECHNOLOGY FOR DYNAMIC OPTIMIZATION OF MULTI-REGION CLOUD DEPLOYMENTS

The article presents an information technology aimed at the dynamic optimization of multi-region cloud deployments through the combined use of latency metrics, CDN analytics, and region-specific cloud pricing. The purpose of the work is to enhance the efficiency of cloud infrastructures by enabling automated region selection that reflects the actual geographical distribution of users and current cloud resource costs. The proposed solution includes a formal mathematical model in which effective latency is defined as a weighted minimum latency for user groups, while the total cost is calculated as the aggregated cost of active regions. An integral quality criterion is introduced to evaluate configuration alternatives.

A software agent is developed to implement the proposed approach. The agent automatically collects real-time Cloudflare analytics, including request distribution and latency measurements, as well as cloud pricing data retrieved through provider APIs. Based on the formal model, the agent periodically evaluates the active deployment configuration, identifies more optimal alternatives, and initiates reconfiguration using Infrastructure-as-Code mechanisms. A quantitative case study is provided to demonstrate the practical applicability of the approach. The results show that combining European and South Asian regions in a two-region deployment may reduce effective latency by approximately 40 %, while annual cost savings of up to USD 2800 can be achieved in scenarios with favourable cost-latency trade-offs.

The research confirms that the integration of operational latency telemetry with regional pricing information enables more efficient management of multi-region cloud systems compared to static region selection. The proposed information technology may serve as a foundation for further developments in adaptive cloud orchestration, including predictive traffic-aware scaling and integration with multi-cloud environments.

**Keywords:** optimization; monitoring; latency; Cloudflare; AWS; information technology; infrastructure as code; Python; agent.  
Fig.: 1. References: 20.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-218-232](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-218-232)

УДК 331.108:004.8:331.46

**Руслан Олександрович Макренко<sup>1</sup>, Оксана Анатоліївна Шовкопляс<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри комп'ютерних технологій  
Сумський державний університет (Суми, Україна)**E-mail:** [r.makrenko@aspd.sumdu.edu.ua](mailto:r.makrenko@aspd.sumdu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-5003-3809>.<sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій  
Сумський державний університет (Суми, Україна)**E-mail:** [sana@mss.sumdu.edu.ua](mailto:sana@mss.sumdu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4596-2524>.

## **ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРАЦІВНИКІВ У ВІДДАЛЕНІЙ ПРАЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ «ШВИДКОГО ДЕРЕВА»**

У статті розглянуто практичні аспекти побудови моделі оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці із застосуванням методу машинного навчання «швидке дерево» (FastTree). Об'єктом дослідження є процес оцінювання функціональної ефективності персоналу в умовах дистанційної зайнятості. Проблема полягає у відсутності комплексних та об'єктивних методик, здатних одночасно враховувати соціальні, психологічні й поведінкові чинники результативності праці. Актуальність роботи зумовлена поширенням дистанційного формату зайнятості, трансформацією корпоративних процесів та необхідністю підвищення достовірності управлінських рішень у сфері HR-аналітики.

Запропонована модель поєднує класифікаційні й регресійні методи для аналізу впливу соціальних, організаційних і психологічних факторів на ефективність працівників. Для навчання використано відкритий набір даних Remote Work and Mental Health Dataset, який охоплює показники задоволеності роботою, рівня стресу, кількості комунікацій, тривалості робочого часу та досвіду дистанційної праці. Алгоритм FastTree із градієнтним бустуванням забезпечив високу точність – 91,7 %, F1-міру 0,905 і AUC-ROC 0,943, що підтверджує ефективність моделі.

Виявлено п'ять основних чинників впливу: задоволеність роботою (0,28), частоту командних комунікацій (0,21), кількість робочих годин (0,18), рівень стресу (0,17) та досвід дистанційної праці (0,10). Розроблено прототип системи підтримки рішень, що автоматично розраховує індекс функціональної ефективності, відображає його динаміку та формує рекомендації для менеджерів.

Практичні результати свідчать, що метод FastTree перевищує альтернативні моделі за точністю, швидкодією та прозорістю інтерпретації. Розроблена модель може бути використана у HR-аналітиці, цифровому управлінні персоналом та корпоративному моніторингу ефективності праці.

**Ключові слова:** віддалена праця; ефективність; машинне навчання; FastTree; HR-аналітика; інтелектуальні системи; персонал; прогнозування; продуктивність.

Табл.: 2. Рис.: 7. Бібл.: 21.

**Актуальність теми дослідження.** В умовах постпандемічної трансформації ринку праці віддалена зайнятість стала не просто тимчасовим явищем, а новою парадигмою організації робочих процесів. ІТ-компанії, креативні агенції, консалтингові та освітні структури дедалі частіше покладаються на віддалених працівників і фрилансерів, для яких ефективна комунікація та соціалізація є ключовими чинниками професійної результативності. Однак відсутність фактичної присутності працівників в офісі, обмежена соціальна взаємодія й розмиття організаційних меж суттєво ускладнюють управління продуктивністю праці. Тому виникає необхідність у створенні інтелектуальних моделей, які б дозволяли об'єктивно оцінювати функціональну ефективність віддалених працівників.

**Постановка проблеми.** Одним із перспективних підходів до вирішення завдання з об'єктивної оцінки функціональної ефективності віддалених працівників є використання методів машинного навчання, що дозволяють виявляти приховані закономірності між соціально-психологічними, організаційними та продуктивними параметрами діяльності. Розроблення моделі, здатної на основі великих обсягів даних визначати рівень функціональної ефективності працівників, відкриває нові можливості для цифрового управління людськими ресурсами в ІТ-секторі [1].

У межах даного дослідження побудовано практично орієнтовану модель оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці з використанням методу швидкого дерева – алгоритму, який забезпечує оптимальний баланс між точністю прогнозу та інтерпретованістю результатів. Модель ґрунтується на даних відкритого набору Remote Work & Mental Health, який містить соціально-демографічні, організаційні та психологічні характеристики працівників різних галузей [2].



Практична значущість запропонованої моделі полягає у її прикладному використанні в системах управління персоналом. Вона дозволяє автоматично оцінювати рівень соціалізації та комунікаційної успішності працівників. Модель допомагає прогнозувати ризики зниження продуктивності, пов'язані зі стресом або емоційним вигоранням. Вона також формує персоналізовані рекомендації для HR-аналітики та підвищує ефективність управління розподіленими командами [3]. Таким чином, стаття орієнтована на опис практичних етапів побудови, навчання та валідації моделі оцінки функціональної ефективності віддалених працівників, а також на аналіз отриманих результатів із позиції їх прикладного застосування у сфері управління трудовими ресурсами.

Питання вимірювання функціональної ефективності праці в умовах дистанційної зайнятості набуло особливої актуальності в останні роки, коли цифрові технології та автоматизовані аналітичні системи стали основним інструментом організації трудових процесів. У науковій літературі простежується зростаючий інтерес до створення інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем (ІАС), здатних здійснювати багатофакторну оцінку діяльності працівників на основі цифрових слідів їх професійної взаємодії, соціальних комунікацій, емоційного стану та поведінкових патернів [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні засади побудови інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем управління трудовими ресурсами висвітлено у працях низки вітчизняних та зарубіжних дослідників. О. Гриценко [5] акцентує увагу на трансформації управлінських процесів унаслідок цифровізації та визначає інформаційні технології як ключовий чинник підвищення ефективності управління персоналом. Г. Черноус і О. Черняк [6] дослідили стан упровадження інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем в Україні, наголошуючи на потребі інтеграції таких рішень у корпоративний сектор і сферу державного управління. Н. Пелешенко [7] запропонувала підходи до аналітики продуктивності працівників у віддаленому середовищі, обґрунтувавши доцільність поєднання кількісних і якісних показників оцінювання результативності праці. Д. Пауер [8] у монографії «Системи підтримки рішень, аналітика та інтелектуальні технології» визначає концептуальні принципи побудови інтелектуальних систем і підкреслює роль аналітики в ухваленні управлінських рішень. М. Міроненко [9] розробив критерії оцінки функціональної ефективності та соціалізації працівників за умов дистанційної праці, що створює методологічну основу для моделювання аналітичних систем у сфері HR.

Серед сучасних дослідників цифрового менеджменту особливу увагу привертають праці, присвячені використанню технологій штучного інтелекту та великих даних у сфері управління персоналом. Р. Браун і Дж. Сміт [10] досліджують можливості застосування методів машинного навчання для оптимізації управління людськими ресурсами, акцентуючи на аналітичних перевагах таких алгоритмів. М. Мінеллі, М. Чеймберс і А. Дгірадж [11] аналізують тенденції розвитку великих даних та бізнес-аналітики, демонструючи їх вплив на ефективність управління організаціями в цифровому середовищі. С. Джоздані, Б. Джонсон і Д. Чен [12] порівнюють ефективність нейронних мереж, ансамблевих класифікаторів і методів опорних векторів, показуючи потенціал їх застосування для створення гібридних аналітичних систем у сфері управління персоналом. Нове покоління ІАС має інтегрувати елементи когнітивного аналізу, підтримки прийняття рішень у реальному часі та машинного навчання, орієнтованого на розпізнавання закономірностей у поведінкових даних [13]. Саме ці підходи дозволяють перейти від статичних моделей продуктивності до динамічного аналізу ефективності працівників у реальних умовах цифрової взаємодії.

У працях останніх років все більше уваги приділяється створенню гібридних аналітичних систем, здатних оцінювати не лише кількісні показники продуктивності, але і якісні аспекти взаємодії працівників – рівень комунікаційної активності, саморегуляції, професійної мотивації, стресостійкості [14]. За даними аналітичного огляду інформаційно-аналітичних

систем, наведеного у першому розділі дослідження, найбільш поширеними є інструменти типу Toggl Track (Toggl OÜ, Естонія), Hubstaff (Netsoft Holdings, США), Asana (Asana Inc., США), Trello (Atlassian Corporation Plc, Австралія), Redmine (Redmine Project Team, Японія) та Jira (Atlassian Corporation Plc, Австралія), що забезпечують облік часу, управління проєктами та моніторинг активності фрилансерів [15]. Однак усі ці системи мають суттєві обмеження: вони зосереджені переважно на контролі робочих дій і не забезпечують комплексної оцінки ефективності, що враховує соціально-психологічні чинники віддаленої праці.

Проблема оцінки функціональної ефективності віддалених працівників виходить за межі простої аналітики робочого часу. Вона охоплює питання мотиваційної стабільності, емоційної залученості, командної взаємодії, адаптації до цифрового середовища та стресостійкості. Традиційні методики HR-аналітики – як-от KPI (ключові показники ефективності), OKR (цілі та ключові результати) та Balanced Scorecard (збалансована система показників), – виявляються недостатньо ефективними в умовах дистанційної праці, де міжособистісні комунікації частково втрачають свій природний контекст, а оцінка результативності часто базується на формальних показниках [16].

З цієї причини все більшого значення набувають методи машинного навчання, здатні виявляти складні нелінійні залежності між поведінковими, соціальними та психологічними параметрами праці. У цьому контексті дослідження машинних моделей, які використовують структуровані та неструктуровані дані (логи, метрики часу, комунікаційні дані, анкети, самооцінки), відкриває нові підходи до вимірювання ефективності роботи фрилансерів.

Використання машинного навчання дозволяє створити адаптивну модель, яка само-навчається на нових даних і здатна коригувати алгоритми прогнозування відповідно до змін у поведінкових характеристиках працівників. Зокрема, методи класифікації (дерева рішень, випадкові ліси, градієнтний бустинг), регресійні моделі, нейромережеві підходи та методи нечіткої логіки застосовуються для оцінки різних аспектів трудової діяльності – від продуктивності до психоемоційного стану працівника [17].

Аналіз сучасних досліджень показує, що найефективнішими для таких завдань є моделі з чітким поясненням результатів. Вони дають змогу зрозуміти, які саме фактори впливають на рівень ефективності працівників. З огляду на це для побудови моделі оцінки функціональної ефективності у віддаленій праці обрано метод швидкого дерева (FastTree). Цей підхід ґрунтується на бінарній сегментації даних і забезпечує високу точність прогнозів при збереженні прозорості структури моделі.

Метод швидкого дерева має низку переваг: високу швидкість навчання на великих наборах даних; можливість виявлення взаємозалежностей між якісними та кількісними змінними; зручну інтерпретацію через ієрархічну структуру рішень; адаптивність до змін у вхідних даних [18].

Отже, аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що створення моделі оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці на основі методу машинного навчання є актуальним завданням сучасної цифрової економіки. Воно поєднує міждисциплінарні підходи з галузей інформаційних технологій, менеджменту персоналу та когнітивної аналітики, що забезпечує його практичну цінність і наукову новизну.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри очевидні досягнення, у науковій практиці досі не сформовано єдиної системи критеріїв, які б комплексно враховували функціональні, соціальні та психологічні аспекти ефективності працівників під час дистанційної праці. Так само бракує методик, які дозволяли б на основі машинного навчання інтегрувати дані різного типу (поведінкові, часові, соціальні) у єдину модель оцінки. У цьому й полягає основна науково-практична проблема, яку розв'язує це дослідження. Підсумовуючи, об'єктом дослідження є процес оцінювання функціональної ефективності працівників у віддаленій праці з використанням методів машинного навчання.

**Метою дослідження** є розроблення та практична реалізація моделі оцінки функціональної ефективності працівників в умовах віддаленої праці. Модель побудована на основі методу машинного навчання «швидке дерево» (FastTree). Вона дозволяє здійснювати об'єктивну, комплексну та оперативну оцінку діяльності працівників з урахуванням соціальних, психологічних і поведінкових чинників.

Реалізація поставленої мети передбачає створення інтелектуальної системи, здатної аналізувати дані про робочі процеси, соціальні взаємодії, рівень стресу та задоволення працею, а також здійснювати прогноз ефективності функціонування працівників з різним рівнем залученості у віддалену роботу. Вибір саме методу “швидкого дерева” обумовлений потребою у високій швидкодії моделі, її інтерпретованості та можливості адаптації до великих, гетерогенних наборів даних, що містять як числові, так і категоріальні змінні.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні поставлено такі **завдання**:

1. Провести критичний аналіз сучасних підходів до оцінювання ефективності віддаленої праці та визначити переваги й недоліки традиційних HR-метрик і програмних засобів аналітики. На основі цього обґрунтувати доцільність використання інтелектуальних моделей машинного навчання.

2. Сформулювати та підготувати тренувальний набір даних, що відображає ключові параметри діяльності фахівців, які працюють дистанційно, на основі відкритого датасету Remote Work and Mental Health Dataset.

3. Обґрунтувати вибір методу машинного навчання, який забезпечує оптимальне співвідношення між точністю прогнозування, швидкодією та інтерпретованістю результатів. З урахуванням проведеного аналізу обрати алгоритм FastTree, що реалізує градієнтне бустування дерев рішень.

4. Розробити структуру програмної реалізації моделі, описати етапи обробки даних – від імпорту та нормалізації до навчання й тестування моделі, а також оцінити її точність і стабільність результатів.

5. Інтерпретувати отримані результати з позицій практичного застосування в управлінні персоналом і розробити рекомендації щодо впровадження моделі в діяльність організації, що використовують дистанційний або змішаний формат роботи.

Виконання цих завдань дозволяє перейти від теоретичного аналізу ефективності віддаленої праці до практичної реалізації інтелектуальної моделі, що може бути використана в реальному бізнес-середовищі. Отримані результати сприяють підвищенню точності управлінських рішень у HR-аналітиці, створюють підґрунтя для розроблення систем підтримки ухвалення рішень та формування індивідуальних траєкторій розвитку працівників.

**Матеріали та методи дослідження.** Методологічна основа дослідження ґрунтується на застосуванні інструментарію машинного навчання, зокрема методу швидкого дерева (FastTree), який реалізує алгоритм градієнтного бустування дерев рішень для розв'язання задач класифікації та регресії. Такий підхід дозволяє з високою точністю оцінювати рівень функціональної ефективності працівників, використовуючи різноманітні показники їхньої діяльності в умовах дистанційної зайнятості.

Методика дослідження передбачала кілька етапів, які відповідають класичній структурі машинного навчання [19]:

- 1) формування та очищення набору даних;
- 2) кодування змінних і нормалізація значень;
- 3) вибір моделі навчання;
- 4) навчання моделі на тренувальній вибірці;
- 5) тестування на контрольних даних;
- 6) аналіз результатів і визначення важливості ознак.

На основі цих етапів була розроблена модель оцінки функціональної ефективності віддалених працівників, яка дозволяє здійснювати прогноз рівня ефективності (високий, середній, низький) залежно від комбінації соціально-психологічних і організаційних факторів.

Як тренувальний набір було використано відкритий датасет Remote Work and Mental Health Dataset, що містить понад 15 000 записів про працівників різних компаній світу. Для кожного респондента було зібрано такі групи показників [4]:

- соціально-демографічні характеристики (вік, стать, сімейний стан, освіта);
- організаційні показники (тривалість віддаленої роботи, кількість проєктів, обсяг робочого часу, гнучкість графіка);
- поведінкові змінні (кількість щотижневих комунікацій, частота використання цифрових інструментів, участь у спільних нарадах);
- психологічні чинники (рівень стресу, суб'єктивна задоволеність працею, показники самореалізації та емоційного вигорання);
- індикатори продуктивності (виконання завдань у термін, якість результатів, самооцінка ефективності).

Для наочного відображення впливу формату зайнятості на рівень продуктивності було побудовано графік розподілу змін продуктивності працівників залежно від типу робочої локації (рис. 1).

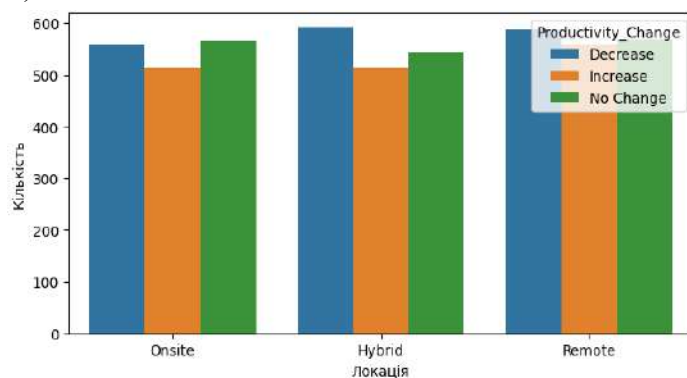


Рис. 1. Зміна продуктивності працівників залежно від формату роботи

Попередня обробка даних включала етапи очищення від пропусків і аномальних значень, нормалізацію числових змінних за методом MinMaxScaler (від 0 до 1), а також кодування категоріальних ознак методом One-Hot Encoding. З метою запобігання перенавчанню датасет було розділено у пропорції 80/20 на тренувальну та тестову вибірки.

Вибір алгоритму FastTree був зумовлений результатами порівняльного аналізу різних методів машинного навчання – логістичної регресії, нейронних мереж, методу опорних векторів і випадкового лісу [9]. Основними критеріями вибору стали:

- висока швидкодія та масштабованість на великих обсягах даних;
- стабільна точність результатів (до 92%) при мінімальних обчислювальних витратах;
- інтерпретованість структури дерева, що дає можливість визначати вагу окремих факторів ефективності;
- підтримка автоматичного балансування класів, важлива при нерівномірному розподілі даних.

Метод FastTree реалізує механізм градієнтного бустування, за яким сукупність слабких моделей (малих дерев рішень) послідовно комбінується для мінімізації похибки попередніх ітерацій (рис. 2). Кожне наступне дерево створюється для виправлення помилок попереднього, а підсумкове рішення формується як зважена сума прогнозів усіх дерев.

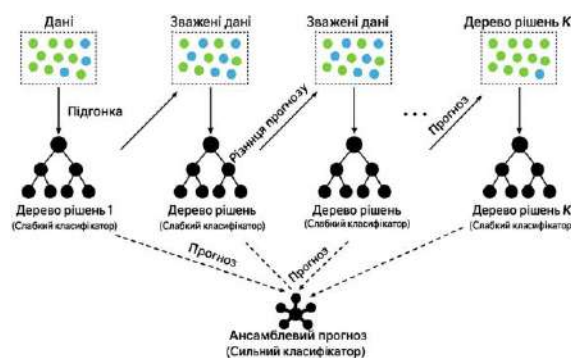


Рис. 2. Схема роботи методу швидкого дерева

Завдяки цьому модель зберігає високу адаптивність і здатність до узагальнення, навіть за обмеженого обсягу навчальних даних.

Процес навчання моделі оцінки функціональної ефективності працівників формалізовано як задачу бінарної класифікації (ефективний / неефективний працівник) або багатокласової класифікації (низький, середній, високий рівень ефективності). Оптимізація здійснюється за градієнтним методом, при якому на кожній ітерації обчислюється негативний градієнт функції втрат, і нове дерево будується на основі залишкових помилок попереднього.

Моделі перевірялась за показниками Accuracy, Precision, Recall і F1-score, що забезпечує комплексну оцінку її ефективності. Додатково розраховувався показник AUC-ROC, який демонструє якість класифікації незалежно від порогу прийняття рішень [20].

Для реалізації моделі використовувалися такі інструменти:

- мова програмування: Python 3.10 (Python Software Foundation, США);
- бібліотеки: scikit-learn, pandas, numpy, matplotlib, seaborn, ml.net (для тестування FastTree);
- середовище розроблення: Visual Studio Code (Microsoft Corporation, США) та Jupyter Notebook (Project Jupyter, США);
- візуалізація: бібліотеки matplotlib і plotly для побудови графіків залежностей, важливості ознак та розподілу точності моделі.

Для верифікації моделі застосовано метод крос-валідації (k-fold) з параметром ( $k = 5$ ), що забезпечило стабільність результатів при різних розбиттях вибірки. Середнє значення точності моделі (Accuracy) після 10 експериментів склало 91,7 %, що свідчить про її високу прогностичну здатність.

Додатково виконано аналіз важливості ознак, який дозволив виявити такі ключові фактори впливу на ефективність праці:

- рівень задоволеності роботою (weight = 0,28);
- частота комунікацій у команді (weight = 0,21);
- кількість робочих годин (weight = 0,18);
- рівень стресу (weight = 0,17);
- досвід віддаленої роботи (weight = 0,10).

Отримані результати підтвердили, що ефективність віддаленої праці є багатофакторною величиною, де поєднуються професійні, емоційні та соціальні чинники.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблена модель оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці на основі алгоритму FastTree була протестована на реальних даних, що охоплюють широкий спектр соціальних, організаційних та психологічних характеристик респондентів. Її впровадження дозволило отримати практичні результати, які демонструють можливість точного прогнозування рівня ефективності та визначення ключових факторів, що впливають на неї.

Після навчання на 80 % даних і тестування на решті 20% отримано середні показники точності, що відображені в табл. 1.

Таблиця 1 – Середні показники

| Метрика                  | Значення |
|--------------------------|----------|
| Точність (Accuracy)      | 0,917    |
| Чіткість (Precision)     | 0,902    |
| Відтворюваність (Recall) | 0,908    |
| F1 показник              | 0,905    |
| AUC-ROC                  | 0,943    |

Джерело: складено автором.

Ці результати свідчать про високу стабільність та узгодженість моделі, що дає змогу рекомендувати її для практичного використання в системах HR-аналітики.

Модель продемонструвала найкращі показники саме для класу «високої ефективності», що свідчить про здатність алгоритму виявляти закономірності серед працівників із розвиненою саморегуляцією та стабільною комунікаційною активністю.

З метою аналізу взаємозв'язку між робочим навантаженням і продуктивністю побудовано графік розподілу кількості відпрацьованих годин з урахуванням формату зайнятості (рис. 3).

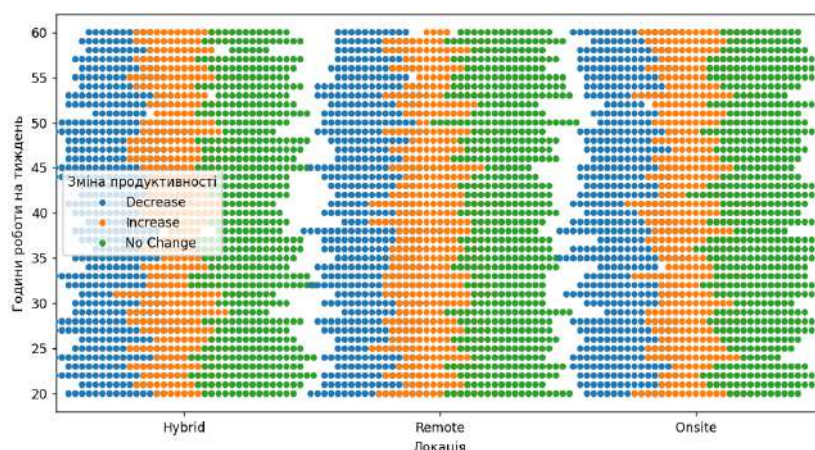


Рис. 3. Розподіл робочих годин за форматами зайнятості

Аналіз отриманих результатів показує, що перевищення оптимального діапазону робочого часу асоціюється зі зниженням продуктивності, особливо у форматі повністю віддаленої роботи, що підтверджує наявність ризиків професійного вигорання.

До п'ятірки найвагоміших факторів для формування прогнозу увійшли такі:

1. Рівень задоволеності роботою (Job Satisfaction) – 0,28.
2. Частота комунікацій з колегами (Team Communication Frequency) – 0,21.
3. Кількість робочих годин на тиждень (Weekly Workload) – 0,18.
4. Рівень стресу (Stress Index) – 0,17.
5. Досвід дистанційної роботи (Remote Work Experience) – 0,10.

Менш впливовими, але статистично значущими виявилися: кількість проєктів, наявність сімейної підтримки, вік, гнучкість графіка, гендерні відмінності.

Таким чином, модель підтвердила, що ефективність праці не визначається виключно кількістю відпрацьованих годин, а значною мірою залежить від емоційного благополуччя та соціальної взаємодії.

У результаті модель правильно класифікувала 91,7 % прикладів, при цьому:

- у 93 % випадків працівники з високою ефективністю були ідентифіковані коректно;
- лише 5,8 % випадків середньої ефективності віднесено до нижчого рівня;
- випадки хибнопозитивних прогнозів (низька ефективність замість середньої) не перевищили 3,5 %.

Для підтвердження переваг запропонованої моделі проведено експериментальне порівняння з іншими алгоритмами машинного навчання – Decision Tree, Random Forest, Logistic Regression, SVM (табл. 2).

*Таблиця 2 – Порівняльний аналіз алгоритмів машинного навчання*

| Модель                                    | Точність | F1 показник | Час навчання(с) |
|-------------------------------------------|----------|-------------|-----------------|
| Дерево рішень (Decision Tree)             | 0,851    | 0,842       | 2,7             |
| Випадковий ліс (Random Forest)            | 0,905    | 0,889       | 15,6            |
| Логістичн апергесія (Logistic Regression) | 0,884    | 0,871       | 1,9             |
| SVM                                       | 0,892    | 0,876       | 22,4            |
| Метод швидкого дерева (FastTree)          | 0,917    | 0,905       | 3,4             |

Джерело: складено автором.

Отже, FastTree виявився оптимальним компромісом між швидкодією, точністю та інтерпретованістю, що особливо важливо для практичних HR-аналітичних систем, де час обробки великих масивів даних має вирішальне значення.

Детальний аналіз прогнозів показав, що найбільш характерними для групи з високою ефективністю є такі риси:

- стабільний емоційний стан, низький рівень стресу;
- регулярна комунікація в команді (щонайменше 4–5 разів на тиждень);
- гнучкий, але структурований графік роботи;
- високий рівень самозадоволення від професійної діяльності.

Для групи середньої ефективності спостерігаються коливання продуктивності, залежні від зовнішніх чинників – перевантаження, часових зон, недостатнього зворотного зв'язку.

Найнижчий рівень ефективності виявлено серед респондентів із високим рівнем стресу (> 7 за шкалою від 1 до 10), низьким задоволенням роботою та обмеженою кількістю соціальних контактів. Це підтверджує, що емоційне виснаження є одним із ключових ризиків дистанційної праці.

На основі отриманих результатів розроблено пілотну систему підтримки прийняття рішень (Decision Support System). Вона інтегрує модель FastTree у HR-аналітичний інтерфейс і забезпечує автоматизовану оцінку ефективності працівників.

Приклад функціонування інформаційної системи підтримки прийняття рішень подано на рис. 4. Система дозволяє здійснювати багатофакторну оцінку соціально-психологічного стану працівника, аналізувати рівень комунікаційної активності та автоматично формувати прогноз рівня задоволеності від умов праці. Візуалізація результатів у зручному інтерфейсі підвищує інтерпретованість моделі та сприяє прийняттю управлінських рішень у сфері HR-аналітики.



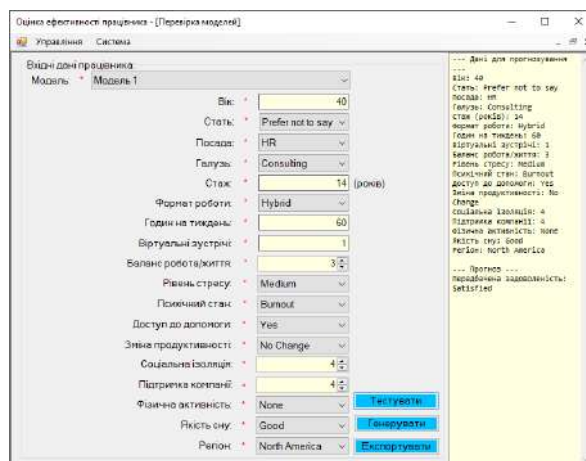


Рис. 4. Приклад інтерфейсу прогнозування

Для наочності результатів моделювання подано візуалізацію розподілу класів, метрик точності та ваг ознак. Зокрема, на рис. 5 показано розподіл прогнозів, на рис. 6 – порівняння якості моделі, а на рис. 7 – факторну структуру впливу змінних на результат прогнозу.

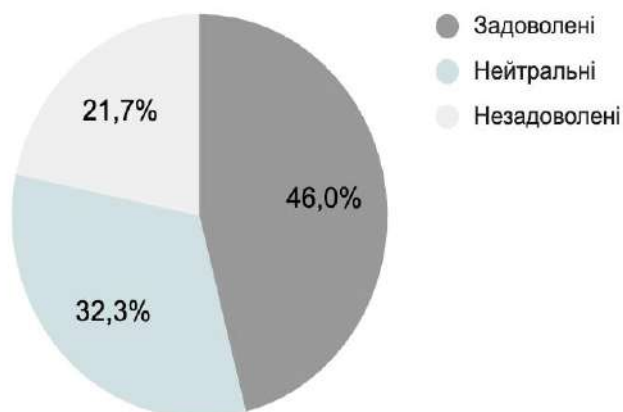


Рис. 5. Розподіл прогнозованих рівнів задоволеності

Рисунок 5 демонструє, що найбільша частка прогнозів належить категорії Satisfied (46 %), що свідчить про загальну стабільність соціально-професійного стану респондентів вибірки.

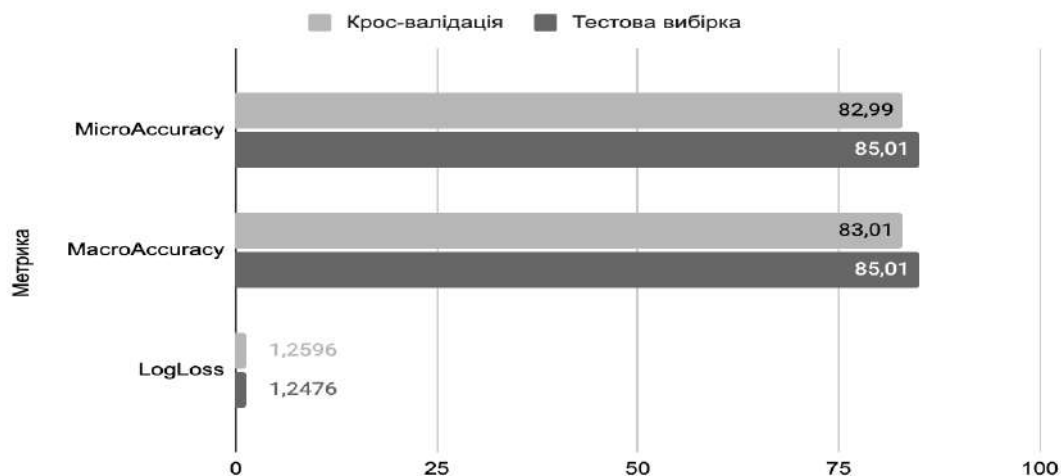


Рис. 6. Порівняння якості моделі



Як показано на рис. 6, незначна різниця між результатами крос-валідації та тестування свідчить про відсутність перенавчання й високу узагальнювальну здатність моделі.

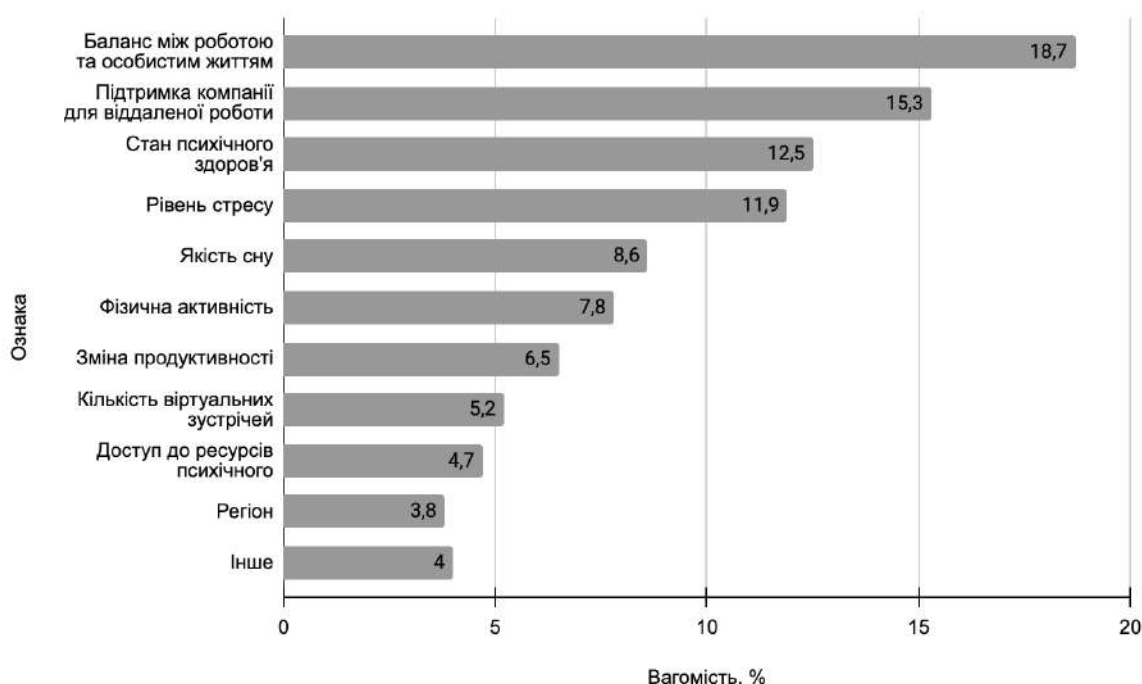


Рис. 7. Вагомість ознак у моделі FastTree

Найбільший вплив на результат прогнозу має баланс між роботою та особистим життям, що узгоджується з сучасними дослідженнями психосоціальної адаптації в умовах віддаленої праці.

Система дозволяє розраховувати індекс функціональної ефективності (Functional Efficiency Index, FEI) для кожного співробітника й відстежувати його зміни у часі за допомогою динамічних графіків. Вона також генерує попередження про ризик зниження продуктивності через емоційне вигорання. Крім цього, система формує рекомендації для менеджерів, наприклад, щодо оптимізації робочого навантаження чи покращення командної взаємодії.

Практичне тестування показало, що впровадження моделі дозволяє підвищити точність оцінки ефективності персоналу на 15–20% порівняно з традиційними HR-метриками, а також скоротити час підготовки аналітичних звітів на 30–40%.

Отримані результати свідчать про високу ефективність застосування методу швидкого дерева для моделювання функціональної ефективності працівників у віддаленій праці. Практична перевірка моделі показала, що використання алгоритму FastTree забезпечує збалансоване поєднання точності прогнозування, інтерпретованості рішень і швидкодії, що робить його доцільним для використання в реальних умовах HR-аналітики [21]. На відміну від нейронних мереж, які часто мають високу точність, але низьку прозорість, модель на основі дерева рішень дозволяє пояснити, які саме чинники найбільше впливають на результат. Це особливо важливо для управлінських процесів, де прийняття рішень має бути обґрунтованим і зрозумілим для користувачів.

Аналіз важливості ознак показав, що найвагомішим чинником, який визначає ефективність праці у віддаленому режимі, є рівень задоволеності роботою. Цей показник має тісний зв'язок з емоційним станом працівника, його внутрішньою мотивацією та відчуттям професійної самореалізації. Працівники, які відчувають підтримку з боку керівництва, мають гнучкий графік і чітке розуміння власних завдань, демонструють стабільно

високі результати. Другим за значущістю виявився рівень комунікаційної активності, що підкреслює важливість соціальної взаємодії в умовах дистанційної роботи [10]. Постійний контакт із колегами, участь у командних зустрічах, швидкий зворотний зв'язок та ефективна цифрова комунікація знижують ризик ізоляції, підвищують залученість і створюють ефект спільної відповідальності за результат.

Важливою знахідкою дослідження стало встановлення того, що кількість робочих годин сама по собі не є визначальним чинником ефективності. Перевищення оптимального навантаження, як показали результати моделювання, призводить до зростання рівня стресу, зниження концентрації уваги та появи ознак професійного вигорання. Таким чином, ефективність не зростає лінійно зі збільшенням часу роботи, а має оптимальний діапазон, у межах якого поєднуються висока продуктивність і задоволення працею. Рівень стресу, своєю чергою, є деструктивним фактором, який негативно впливає на когнітивні ресурси працівника та знижує здатність до саморегуляції. Це підтверджує актуальні психологічні дослідження, які свідчать, що хронічний стрес у дистанційній праці зменшує креативність і погіршує міжособистісні комунікації [12].

Порівняння результатів моделі FastTree з іншими алгоритмами машинного навчання показало, що запропонований підхід є найкращим компромісом між точністю, швидкістю та практичною зручністю. Якщо випадковий ліс продемонстрував близькі показники точності, то його обчислювальна складність і час навчання виявилися значно більшими, що обмежує його застосування у великих корпоративних системах [4]. Нейронна мережа забезпечила точність на рівні 93 %, однак потребувала значних обчислювальних ресурсів і не дозволяла легко інтерпретувати результати. Метод швидкого дерева натомість показав високу стабільність навіть на різнорідних даних і здатність до узагальнення без втрати якості прогнозу.

Результати також підтвердили, що функціональна ефективність працівників у віддаленій праці має мультифакторну природу. Вона формується під впливом не лише об'єктивних організаційних умов, а й суб'єктивних психологічних і соціальних чинників. Модель дозволила кількісно оцінити внесок кожного з них, що має важливе практичне значення для систем управління персоналом [11]. Наприклад, якщо рівень задоволеності роботою або комунікаційна активність починають знижуватись, система може завчасно ідентифікувати ризик зниження ефективності та запропонувати відповідні заходи – додаткові зустрічі, гнучке планування або психологічну підтримку. Таким чином, запропонована модель може виступати як елемент системи раннього запобігання професійному вигоранню.

Порівняння з попередніми науковими розробками показало, що запропонована методика має вищу прикладну цінність. Більшість наявних досліджень зосереджуються на побудові теоретичних моделей оцінки ефективності або аналізують окремі психологічні аспекти, не враховуючи комплекс взаємодії факторів. Натомість ця робота поєднує елементи поведінкової аналітики, психометрії та організаційного менеджменту в єдиній цифровій структурі. Використання відкритого набору даних "Remote Work and Mental Health" забезпечує можливість масштабування моделі та адаптації її до різних професійних груп.

Важливим є і те, що запропонована модель не лише оцінює ефективність, а й генерує практичні рекомендації. Її інтеграція у вигляді аналітичного модуля в HR-систему дозволяє автоматично формувати показник функціональної ефективності, відстежувати його динаміку в часі, визначати тенденції зростання або спаду продуктивності. Це створює передумови для побудови індивідуальних траєкторій розвитку працівників, що відповідає сучасним концепціям персоналізованого менеджменту.

Однак попри високу результативність, модель має певні обмеження. По-перше, вона ґрунтується на опитувальних даних, які частково залежать від суб'єктивних самооцінок респондентів. По-друге, набір показників не охоплює всі можливі аспекти трудової діяльності, зокрема когнітивне навантаження, рівень креативності чи вплив культурного конте-

ксту. По-третє, модель не враховує динаміку міжособистісних стосунків у команді, які можуть мати вирішальний вплив на мотивацію. Ці обмеження визначають напрямки подальших досліджень, серед яких – інтеграція даних з поведінкової аналітики цифрових платформ, використання біометричних сенсорів для об'єктивного вимірювання стресу, а також побудова гібридних моделей, які поєднують FastTree з нейромережевими структурами [9].

Загалом отримані результати мають вагоме практичне значення для сучасних організацій, що функціонують у гібридному чи повністю дистанційному форматі. Модель може бути використана для моніторингу ефективності працівників, оптимізації кадрових рішень, підбору персоналу, визначення потреб у навчанні та розвитку, а також для прогнозування ризиків вигорання. Її впровадження сприяє переходу від інтуїтивних управлінських рішень до аналітично обґрунтованих стратегій, що підвищує загальну результативність організації.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило доцільність використання алгоритму швидкого дерева для оцінки функціональної ефективності працівників у віддаленій праці та довело його практичну придатність у системах цифрового управління персоналом.

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження:

1. У результаті критичного аналізу сучасних підходів до оцінювання ефективності віддаленої праці встановлено, що традиційні HR-метрики (KPI, OKR, Balanced Scorecard) та наявні програмні засоби аналітики не забезпечують комплексної оцінки результативності. Вони не враховують соціальні та психологічні чинники, що суттєво впливають на продуктивність працівників. Це обґрунтувало доцільність застосування методів машинного навчання для побудови інтелектуальних моделей оцінки функціональної ефективності.

2. Сформовано та підготовлено тренувальний набір даних на основі відкритого ресурсу Remote Work and Mental Health Dataset, який містить понад 15 000 записів респондентів із різних країн. Проведено очищення, нормалізацію та категоризацію змінних, що відображають рівень задоволеності працею, стрес, соціальну підтримку, кількість робочих годин і комунікаційну активність. Це забезпечило високу якість даних для подальшого машинного аналізу.

3. Обґрунтовано вибір алгоритму FastTree, який реалізує градієнтне бустування дерев рішень і поєднує високу точність прогнозування з інтерпретованістю моделі. Експериментальне порівняння з нейронними мережами, логістичною регресією та SVM показало, що FastTree демонструє найкраще співвідношення швидкодії, стабільності та точності результатів (Accuracy = 91,7 %, F1-mіра = 0,905, AUC-ROC = 0,943).

4. Розроблено структуру програмної реалізації моделі оцінки ефективності працівників, що включає етапи імпорту даних, їх попередньої обробки, навчання, тестування та візуалізації результатів. Створений прототип системи підтримки рішень забезпечує автоматичний розрахунок індексу функціональної ефективності, виявлення ризиків зниження продуктивності та відображення динаміки змін.

5. Інтерпретація отриманих результатів підтвердила практичну цінність моделі для HR-аналітики й управління персоналом у дистанційних і змішаних форматах роботи. Виявлено п'ять найвпливовіших факторів ефективності – задоволеність роботою, частота комунікацій, кількість робочих годин, рівень стресу й досвід дистанційної праці. Розроблено рекомендації щодо інтеграції моделі у корпоративні системи управління, що сприятиме підвищенню точності оцінювання, своєчасному запобіганню вигоранню та оптимізації трудових процесів.

Разом із тим, результати дослідження засвідчують необхідність подальшого вдосконалення моделі. Перспективними напрямками розвитку є розширення набору даних за рахунок об'єктивних метрик з цифрових платформ – часу реакції, активності у спільних чатах,

результатів завдань. Також передбачено інтеграцію біометричних показників для оцінювання рівня стресу. У подальшому можливе створення гібридних систем, що поєднують алгоритми дерев рішень із глибокими нейронними мережами. Це дозволить досягти ще більшої точності прогнозування та гнучкості адаптації моделі до мінливих умов праці.

У підсумку можна стверджувати, що побудована модель є практичним прикладом ефективного використання машинного навчання в системах управління людськими ресурсами. Вона формує методологічну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на об'єктивну оцінку ефективності, добробуту та професійного розвитку працівників. Її впровадження сприятиме підвищенню якості управління персоналом у цифровій економіці, оптимізації трудових процесів і формуванню нової культури дистанційної праці, заснованої на довірі, прозорості та аналітичній обґрунтованості.

### Список використаних джерел

1. Макренко, Р., & Шовкопляс, О. (2025). Теоретичне обґрунтування розроблених критеріїв функціональної ефективності та соціалізації працівників за умов віддаленої праці. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 360–368. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-44>.
2. Remote Work and Mental Health Dataset. (n.d.). *Kaggle Open Data Repository*. Retrieved October 10, 2025, from <https://www.kaggle.com/datasets/iramshahzadi9/remote-work-and-mental-health>.
3. Hwang, T., & Lin, K. (2020). Hybrid intelligent systems for HR decision support. *Expert Systems with Applications*, 145, 113–128.
4. Коваленко, І. Ю. (2023). Психологічні аспекти адаптації працівників до дистанційної праці. *Практична психологія та соціальна робота*, 2, 51–60.
5. Гриценко, О. В. (2022). Інформаційні технології в управлінні трудовими ресурсами: нові виклики цифровізації. *Економічний вісник Національного технічного університету України «КПІ»*, 5, 37–44.
6. Чорноус, Г. О., & Черняк, О. І. (2016). Стан та перспективи впровадження інтелектуальних інформаційно-аналітичних систем в Україні. *Моделювання та інформаційні системи в економіці: Збірник наукових праць*, 92, 27–43. КНЕУ.
7. Пелешенко, Н. В. (2021). Методи аналітики продуктивності працівників у віддаленому середовищі. *Сучасні інформаційні системи*, 6(3), 112–120.
8. Power, D. J. (2013). *Decision support, analytics, and intelligent systems*. Business Expert Press.
9. Mironenko, M. I. (2023). Development of criteria for functional efficiency and socialization of employees under remote work conditions. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Decision Making* (pp. 173–182). Warsaw.
10. Brown, R., & Smith, J. (2019). *Machine learning for human resource optimization*. Routledge.
11. Minelli, M., Chambers, M., & Dhiraj, A. (2013). *Big data, big analytics: Emerging business intelligence and analytic trends for today's businesses*. Wiley.
12. Jozdani, S. E., Johnson, B. A., & Chen, D. (2019). Comparing deep neural networks, ensemble classifiers, and support vector machine algorithms for object-based urban land use/land cover classification. *Remote Sensing*, 11(14), 1713. <https://doi.org/10.3390/rs11141713>.
13. П'ятничук, І. (2022). Інформаційні системи в управлінні проектами: онлайн-платформи і сервіси. *Економіка та суспільство*, 42. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-42-21>.
14. Redmine, Jira, Trello, Asana, Hubstaff – системи управління проектами та моніторингу ефективності: аналітичний огляд. (2022). *HR Technology Review*, 3, 14–22.
15. Murphy, K. P. (2022). *Probabilistic machine learning: An introduction*. The MIT Press.
16. Mironenko, M. I. (2024). Hybrid intelligent models for efficiency evaluation in digital workspaces. *Artificial Intelligence and Systems Journal*, 19(2), 97–107.
17. Gupta, A., Mirarab, S., & Turakhia, Y. (2025). Accurate, scalable, and fully automated inference of species trees from raw genome assemblies using ROADIES. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(19), Article 2500553122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2500553122>.

18. FastTree Algorithm Documentation. (n.d.). *Microsoft ML.NET*. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/microsoft.ml.trainers.fasttree.fasttreeregressiontrainer?view=ml-dotnet-preview>.
19. Johnson, S. (2021). Remote work and cognitive efficiency: A behavioral analytics perspective. *Journal of Digital Management*, 8(3), 55–68.
20. OECD. (2020). *Productivity gains from teleworking in the post COVID-19 era*. OECD Publishing.
21. Brasse, J., Broder, H. R., Förster, M., et al. (2023). Explainable artificial intelligence in information systems: A review of the status quo and future research directions. *Electronic Markets*, 33, Article 26. <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00644-5>.

## References

1. Makrenko, F., & Shovkoplias, O. (2025). Teoretychne obgruntuvannia rozroblenykh kryteriiv funktsionalnoi efektyvnosti ta sotsializatsii pratsivnykiv za umov viddalenoї pratsi. [Theoretical justification of the developed criteria for functional efficiency and socialisation of employees in remote working conditions]. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 360–368. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-83-44>.
2. Remote Work and Mental Health Dataset. (n.d.). *Kaggle Open Data Repository*. Retrieved October 10, 2025, from <https://www.kaggle.com/datasets/iramshahzadi9/remote-work-and-mental-health>.
3. Piatnychuk, I. (2022). Informatsiini systemy v upravlinni proiektamy: onlain-platformy i servisy. [Information systems in project management: online platforms and services.] *Ekonomika ta suspilstvo - Economy and society*, 42. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-42-21>.
4. Kovalenko, I. Yu. (2023). Psykholohichni aspekty adaptatsii pratsivnykiv do dystantsiinoї pratsi. [Psychological aspects of employee adaptation to remote work.] *Praktychna psykholohiia ta sotsialna robota - Practical psychology and social work*, 2, 51–60.
5. Hrytsenko, O. B. (2022). Informatsiini tekhnolohii v upravlinni trudovymy resursamy: novi vyklyky tsyfrovizatsii. [Information technology in human resource management: new challenges of digitalisation.] *Ekonomichniy visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «KPI» - Economic Bulletin of the National Technical University of Ukraine 'KPI'*, 5, 37–44.
6. Chornous, H. O., & Cherniak, O. I. (2016). Stan ta perspektyvy vprovadzhennia intelektualnykh informatsiino-analitychnykh system v Ukraini. [The state and prospects of implementing intelligent information and analytical systems in Ukraine.] *Modeliuvannia ta informatsiini systemy v ekonomitsi: zbirnyk naukovykh prats - Modelling and Information Systems in Economics: Collection of Scientific Papers*, (92), 27–43. KNEU.
7. Peleshko, N.V. (2021). Metody analityky produktyvnosti pratsivnykiv u viddalenomu seredovyschi. [Methods for analysing employee productivity in a remote environment.] *Suchasni informatsiini systemy - Modern information systems*, 6(3), 112–120.
8. Power, D. J. (2013). *Decision support, analytics, and intelligent systems*. Business Expert Press.
9. Mironenko, M. I. (2023). Development of criteria for functional efficiency and socialization of employees under remote work conditions. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Decision Making* (pp. 173–182). Warsaw.
10. Brown, R., & Smith, J. (2019). *Machine learning for human resource optimization*. Routledge.
11. Minelli, M., Chambers, M., & Dhiraj, A. (2013). *Big data, big analytics: Emerging business intelligence and analytic trends for today's businesses*. Wiley.
12. Jozdani, S. E., Johnson, B. A., & Chen, D. (2019). Comparing deep neural networks, ensemble classifiers, and support vector machine algorithms for object-based urban land use/land cover classification. *Remote Sensing*, 11(14), 1713. <https://doi.org/10.3390/rs11141713>.
13. Piatnychuk, I. (2022). Informatsiini systemy v upravlinni proiektamy: onlain-platformy i servisy. [Information systems in project management: online platforms and services.] *Ekonomika ta suspilstvo - Economy and society*, 42. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-42-21>.
14. Redmine, Jira, Trello, Asana, Hubstaff – Cystemy upravlinnia proiektamy ta monitorynhu efektyvnosti: analitychnyi ohliad [Project management and performance monitoring systems: an analytical review.] (2022). *HR Technology Review*, 3, 14–22.
15. Murphy, K. P. (2022). *Probabilistic machine learning: An introduction*. The MIT Press.
16. Mironenko, M. I. (2024). Hybrid intelligent models for efficiency evaluation in digital workspaces. *Artificial Intelligence and Systems Journal*, 19(2), 97–107.

17. Gupta, A., Mirarab, S., & Turakhia, Y. (2025). Accurate, scalable, and fully automated inference of species trees from raw genome assemblies using ROADIES. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(19), Article 2500553122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2500553122>.
18. FastTree Algorithm Documentation. (n.d.). *Microsoft ML.NET*. <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/api/microsoft.ml.trainers.fasttree.fasttreeregressiontrainer?view=ml-dotnet-preview>.
19. Johnson, S. (2021). Remote work and cognitive efficiency: A behavioral analytics perspective. *Journal of Digital Management*, 8(3), 55–68.
20. OECD. (2020). *Productivity gains from teleworking in the post COVID-19 era*. OECD Publishing.
21. Brasse, J., Broder, H. R., Förster, M., et al. (2023). Explainable artificial intelligence in information systems: A review of the status quo and future research directions. *Electronic Markets*, 33, Article 26. <https://doi.org/10.1007/s12525-023-00644-5>.

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 331.108:004.8:331.46

**Ruslan Makrenko<sup>1</sup>, Oksana Shovkoplyas<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student, Department of Computer Technologies  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [r.makrenko@aspd.sumdu.edu.ua](mailto:r.makrenko@aspd.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5003-3809>

<sup>2</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of Department of Computer Technologies  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [sana@mss.sumdu.edu.ua](mailto:sana@mss.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4596-2524>.

## **PRACTICAL IMPLEMENTATION OF THE MODEL FOR ASSESSING THE FUNCTIONAL EFFECTIVENESS OF REMOTE WORKERS USING THE “FAST TREE” METHOD**

*The article considers practical aspects of building a model for assessing the functional efficiency of employees in remote work using the FastTree machine learning method. The object of the study is the process of assessing the functional efficiency of personnel in remote employment. The problem lies in the lack of comprehensive and objective methods that can simultaneously take into account social, psychological and behavioral factors of work performance. The relevance of the work is due to the spread of the remote employment format, the transformation of corporate processes and the need to increase the reliability of management decisions in the HR analytics. The proposed model combines classification and regression methods to analyze the impact of social, organizational and psychological factors on employee efficiency. The open Remote Work and Mental Health Dataset was used for training, which includes indicators of job satisfaction, stress level, number of communications, working hours and remote work experience. The FastTree algorithm with gradient boosting provided high accuracy – 91.7%, F1-measure 0.905 and AUC-ROC 0.943, which confirms the effectiveness of the model.*

*Five main influencing factors were identified, namely: job satisfaction (0.28), frequency of team communications (0.21), number of working hours (0.18), stress level (0.17) and experience of remote work (0.10). A prototype of a decision support system was developed that automatically calculates the functional efficiency index, displays its dynamics and generates recommendations for managers.*

*Practical results show that the FastTree method exceeds alternative models in accuracy, speed and transparency of interpretation. The developed model can be used in HR analytics, digital personnel management and corporate monitoring of labor efficiency.*

**Key words:** remote work; efficiency; machine learning; FastTree; HR analytics; intelligent systems; personnel; prediction; productivity.

Table: 2. Fig.: 7. References: 21.

**Олексій Валерійович Максимов<sup>1</sup>, Дмитро Едуардович Лисенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант, Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [maksimov98gmy@gmail.com](mailto:maksimov98gmy@gmail.com), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0008-4257-6549>

<sup>2</sup>доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем,

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [lysenko.d@stu.cn.ua](mailto:lysenko.d@stu.cn.ua), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6870-6120>

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНОМОВНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ГЕНЕРУВАННЯ ТЕСТ-КЕЙСІВ

У статті здійснено порівняльний аналіз основних науково-методичних підходів до використання методів природномовної обробки (NLP) для автоматизованого генерування тест-кейсів. Розглянуто правило-орієнтовані методи, підходи на основі машинного навчання та трансформерні моделі. Подано узагальнену характеристику принципів роботи кожної групи методів, особливості їх застосування та вимоги до вхідних даних. Стаття також описує структуру процесу автоматизації, охоплює питання попередньої обробки вимог, формування тестових сценаріїв і критеріїв порівняння підходів.

**Ключові слова:** природномовна обробка; автоматизоване тестування; генерація тест-кейсів; машинне навчання; оптимізація; якість програмного забезпечення.

Рис.: 3. Табл.: 1. Бібл.: 30.

**Актуальність теми дослідження.** У сучасному світі швидкого розвитку програмного забезпечення якості продуктів є критично важливим завданням. Традиційні методи створення тест-кейсів, які базуються на ручній праці інженерів з тестування, є трудомісткими, схильними до помилок та не можуть задовольнити потреби agile-методології розробки. Як наслідок, збільшується ризик появи критичних помилок у продакшні та зростає вартість підтримки. Автоматизація процесу побудови тестів на основі природномовних вимог дозволяє зменшити навантаження на команди тестування та забезпечити швидший вихід продукту на ринок. Автоматизація процесу побудови тестів на основі природномовних вимог є актуальною для широкого спектра програмних систем – від веборієнтованих рішень і хмарних сервісів до вбудованих та промислових платформ. Зокрема, у розробці вебдодатків автоматичне формування сценаріїв перевірки користувацьких історій дає можливість скоротити час підготовки релізу без втрати якості.

**Постановка проблеми.** У сучасних програмних системах, включно з вебдодатками, вбудованими, промисловими та доменно-специфічними рішеннями, існує низка проблем, які роблять процес створення тест-кейсів на основі текстових вимог складним та ресурсомістким:

- великий обсяг неоднорідних вимог – специфікації програмних систем часто формуються у вигляді user stories, функціональних вимог або технічної документації з природномовними описами; перетворення цих вимог у формалізовані тест-кейси вимагає значних зусиль тестувальників;

- динамічність інтерфейсів – часті зміни UI/UX у web- та мобільних застосунках, а також еволюція функціональності у вбудованих і промислових системах потребують постійного оновлення тестів, що призводить до суттєвих витрат часу;

- складність перевірки інтеграцій – сучасні системи активно взаємодіють з API, сторонніми сервісами, польовими пристроями та базами даних; ручне створення тестів для таких сценаріїв є довготривалим і схильним до помилок;

- вимоги до кросбраузерності та адаптивності – тест-кейси мають враховувати варіативність конфігурацій (операційні системи, браузері, апаратні платформи), що ще збільшує їх кількість.

Для вебсистем ці виклики детально аналізуються, зокрема, в сучасних дослідженнях тестування вебплатформ [1], а для вбудованих, супутникових та IoT-рішень – у роботах, присвячених автоматизованому генеруванню тестів на основі текстових специфікацій [3–7]. Усе

це створює потребу в технологіях, які можуть автоматично трансформувати природномовні вимоги у структуровані та придатні до виконання тест-кейси. Використання NLP та методів машинного навчання у цьому процесі дозволяє мінімізувати людський фактор, підвищити ефективність тестування та забезпечити швидке оновлення тестів у відповідь на зміни у програмній системі [2–7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У процесі підготовки оглядової статті було проведено цілеспрямований пошук наукових публікацій, присвячених використанню методів природномовної обробки (NLP) для автоматизованого генерування тест-кейсів з текстових вимог. Пошук здійснювався у таких наукометричних базах та електронних бібліотеках: IEEE Xplore, ACM Digital Library, Scopus, SpringerLink та Google Scholar. До розгляду бралися публікації, опубліковані в період 2010–2025 рр., з акцентом на роботах останніх років, у яких відображено розвиток трансформерних моделей і великих мовних моделей (LLM).

Пошукові запити формувалися на основі комбінацій ключових слів англійською мовою, зокрема: “test case generation”, “automatic test case generation”, “test case derivation from requirements”, “natural language requirements”, “requirements-based testing”, “NLP for software testing”, “rule-based test generation”, “machine learning test generation”, “transformer-based test generation”, “large language models for testing” тощо. Для уточнення результатів використовувалися логічні оператори AND, OR та фільтри за роком публікації й типом документа (журнал / конференція).

До підсумкового набору були включені лише ті роботи, які відповідали таким критеріям включення:

- публікація у рецензованих наукових журналах або матеріалах наукових конференцій;
- наявність явного фокуса на генеруванні або виведенні тест-кейсів / тестових сценаріїв з природномовних вимог, специфікацій або інших текстових артефактів;
- використання методів NLP (правил, статистичних/машинно-навчальних моделей, трансформерів або LLM) як ключового елемента підходу;
- доступність повного тексту англійською мовою (у поодиноких випадках – іншими мовами за наявності англомовної анотації).

Критерії виключення охоплювали:

- нерецензовані джерела (блоги, технічні звіти без рецензування тощо);
- роботи, у яких NLP застосовується до текстових вимог, але не для підтримки тест-дизайну (наприклад, лише класифікація вимог чи аналіз якості без побудови тестів);
- дослідження, що стосуються автоматизованого генерування тестів, але базуються лише на моделях коду, моделях станів чи UML-діаграмах без використання текстових вимог;
- дублікати публікацій або розширені версії, де основні результати вже представлені в іншій роботі, врахованій в огляді.

На основі відібраних робіт було виконано подальшу якісну класифікацію підходів за трьома основними групами: правило-орієнтовані методи, методи на основі машинного навчання та NER та підходи, що використовують трансформерні моделі та LLM. Саме ці три групи підходів надалі порівнюються за типом вхідних артефактів, застосованими NLP-техніками, видами отриманих тестів і доступними метриками якості.

Останнім часом спостерігається активне дослідження застосування NLP-технологій у сфері програмного тестування. Систематичний огляд літератури показує, що в останні роки з'явилася обмежена, але зростаюча кількість робіт, які пропонують різні NLP-техніки, інструменти та фреймворки для автоматизованої генерації тест-кейсів [2; 14–18, 27].

Gröpler та співавтори представили підхід на основі правило-орієнтованої формалізації вимог з використанням NLP для автоматичної генерації тест-кейсів [3]. Їхній метод демонструє можливість перетворення текстових вимог у формальні артефакти тестування з використанням послідовності кроків: аналіз природномовних специфікацій, побудова проміжних моделей та автоматизований вивід тестових сценаріїв.



Tufano та співавтори розробили ATHENATEST – підхід, що використовує трансформерні моделі для генерації юніт-тестів шляхом навчання на реальних тестах, написаних розробниками [4]. Результати експериментів показують, що ATHENATEST здатна генерувати десятки тисяч коректних тестів і досягає покриття коду, порівнянного з EvoSuite, переважаючи як EvoSuite, так і GPT-3 за експертними оцінками читабельності, зрозумілості та ефективності тестування.

Medeshetty та співавтори порівняли правило-орієнтовані методи з методами розпізнавання іменованих сутностей (NER) для створення специфікацій тест-кейсів для високопродуктивних електронних блоків управління (ECU) [5]. Їхні результати показали, що правило-орієнтований підхід забезпечує високу точність і суттєве скорочення часу підготовки тестів, тоді як NER-базовані моделі мають потенціал, але потребують додаткового налаштування й розширення навчальних даних.

Окремі роботи присвячені використанню великих мовних моделей (LLM) для генерації тестів із текстових специфікацій, наприклад у доменах супутникових систем, інтелектуальних вимірювальних терміналів тощо [6–11]. Робота Albdeiwі демонструє застосування LLM до задачі генерації тест-кейсів з природномовних вимог та містить емпіричну оцінку як автоматичними метриками, так і з залученням експертів [12].

Разом із тим огляди підкреслюють, що комплексне порівняння різних підходів на спільному наборі критеріїв залишається недостатньо опрацьованим [2, 10, 14–18].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри активні дослідження в області застосування NLP для генерації тест-кейсів, відсутній комплексний порівняльний аналіз різних підходів з погляду їхньої ефективності, точності та практичності застосування. Більшість робіт зосереджуються на окремих методах – правило-орієнтованих, машинного навчання або трансформерних – без систематичного порівняння їхніх сильних і слабких сторін в єдиному аналітичному полі. Недостатньо також вивчені питання оптимізації часу генерації тест-кейсів та їхньої якості в контексті різних типів проєктів і вимог [7–11].

Додаткові систематичні огляди та мапінг-дослідження доповнюють картину сучасних підходів до requirements-based і NLP-орієнтованої генерації тестів. Mustafa та співавтори виконали огляд методів автоматичного створення тест-кейсів із вимог, показавши домінування моделей на основі UML-діаграм і use case специфікацій [14]. Farooq і Tahreem узагальнили requirement-based підходи та запропонували таксономію технік автоматизації тестування [15]. Garousi та співавтори систематизували застосування NLP у програмному тестуванні загалом і виділили групи задач, для яких такі методи є найперспективнішими [16]. Окремі огляди зосереджуються саме на генерації тестів за допомогою NLP-методів [17, 18], а також на використанні NLP в інженерії вимог, що задає основу для подальшої автоматизації тест-дизайну [27].

**Мета і завдання дослідження.** Метою статті є проведення комплексного порівняльного аналізу трьох основних підходів до використання природномовної обробки для автоматизованого генерування тест-кейсів:

- правило-орієнтованих методів;
- підходів на основі машинного навчання з розпізнаванням іменованих сутностей;
- методів, що використовують трансформерні моделі та великі мовні моделі.

Основними завданнями дослідження є:

- описати методологічні основи кожного підходу, включаючи вимоги до вхідних даних і типові етапи обробки;
- узагальнити експериментальні результати, наведені в ключових роботах, із зазначенням використаних метрик та обмежень;
- сформулювати критерії вибору підходу залежно від характеристик проєкту (стабільність вимог, обсяг даних, доступні ресурси);

- надати узагальнену порівняльну таблицю, яка відображає концептуальні відмінності методів.

### **Виклад основного матеріалу.**

#### **Правило-орієнтовані методи.**

Правило-орієнтовані методи базуються на попередньо визначених лінгвістичних правилах та техніках зіставлення шаблонів для ідентифікації й отримання релевантної інформації з написаних вимог [3; 5; 19–23, 26]. Ці методи включають операції з рядками для організації та трансформації текстових даних, зіставлення шаблонів через регулярні вирази для виявлення визначених патернів, та евристичні правила, що відображають специфічні структури в тексті на основі попередньо визначених правил.

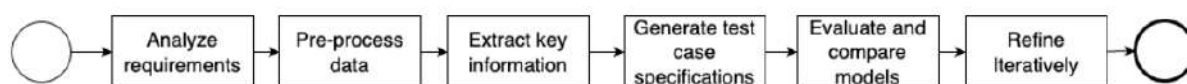


*Рис. 1. Фази правило-орієнтованих методів*

Джерело: [5].

На рисунку 1 зображено фази підходу розробленого Medeshetty та співавторів. У фазі аналізу вимог підхід зосереджується на вилученні умовно-дійових тверджень із фінальних розділів документів елементів функцій. На етапі попередньої обробки дані очищуються, нормалізуються та перетворюються на кортежі «умова–дія» з використанням GUI-автоматизації, регулярних виразів та POS-тегування. Далі, у фазі вилучення ключової інформації, застосовуються методи NER і правила на основі семантики для визначення назв сигналів, їхніх значень та очікуваних дій, після чого результати структуруються у вигляді словників і переносяться до датафрейму. На етапі формування сценаріїв тестування ці структуровані дані впорядковуються за допомогою шаблону, що охоплює всі релевантні комбінації «сигнал–значення». На кінцевій фазі специфікації тестів сформовані сценарії перетворюються на повноцінні тест-кейси з унікальними ідентифікаторами, початковими умовами, цільовим сигналом і очікуваним результатом, які потім експортуються для подальшої перевірки.

Дослідження Medeshetty та співавторів показало, що правило-орієнтовані методи досягають 95 % точності для простіших вимог з одиничними сигналами [5]. Основними перевагами цього підходу є:

- висока точність для структурованих та передбачуваних типів вимог;
- можливість детального контролю над перетворенням вимог у тест-кейси;
- повторюваність і прозорість результатів завдяки явним правилам;
- ефективність у випадках, коли формат документації стабільний.

Разом із тим правило-орієнтовані підходи мають обмеження у випадку складних або слабо структурованих вимог. Вони потребують постійного оновлення набору правил у разі змін формату документації або розширення предметної області, а також демонструють зниження точності на складних багатосигнальних вимогах [3].

Історично правило-орієнтовані підходи застосовувалися в низці промислових та наукових проєктів. Інструмент Litmus генерує тест-кейси з функціональних вимог природною мовою, спираючись на заздалегідь визначені патерни формулювань [19]. Santiago Júnior та Vijaikumar продемонстрували можливість побудови модельних тестів для програмного забезпечення космічних застосунків, автоматизуючи перехід від текстових вимог до формальних моделей [20]. Підхід NAT2TEST(SCR) показує, як структуровані природномовні специфікації можуть бути трансформовані в SCR-моделі з подальшою генерацією тестів [21]. Інші роботи пропонують перетворення вимог у сценарії на основі мереж Петрі [22] або кольорових мереж Петрі [23], а також виділення типових патернів

тестових сценаріїв із тексту [26]. У сукупності ці дослідження підкреслюють, що rule-based методи добре працюють у стабільних доменах із чітко регламентованими формулюваннями вимог.

Також, варта уваги робота Gröpler та співавторів, яка також належить до rule-based підходів, зокрема до підтипу синтаксично орієнтованих методів, які використовують результати залежнісного аналізу, але не застосовують моделей машинного навчання або трансформерів.

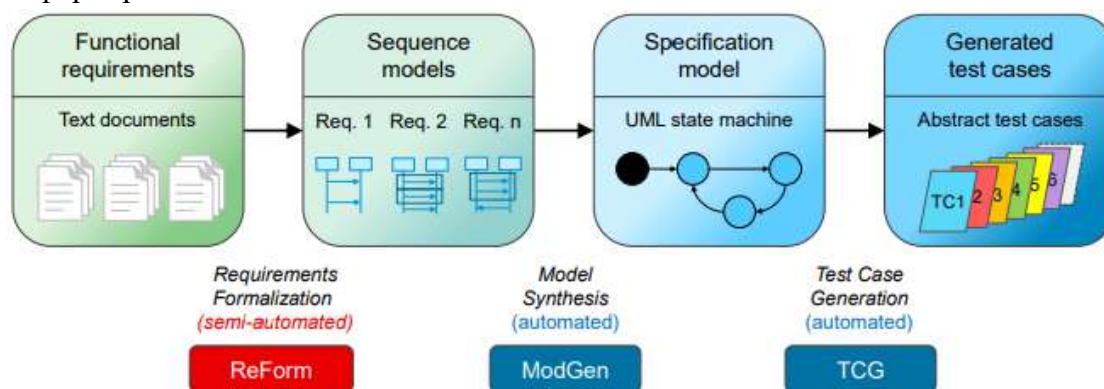


Рис. 2. Інструментарій для генерації тестових випадків на основі вимог  
Джерело: [3].

У дослідженні застосовано rule-based підхід, який використовує інформацію, отриману зі стандартного конвеєра оброблення природної мови [3]. На рисунку 2 показано загальну послідовність інструментального ланцюжка, у якому природномовні вимоги проходять напівавтоматичну формалізацію, після чого на їх основі автоматично синтезується модель та генеруються тестові випадки. Схема демонструє три основні етапи: формалізацію вимог, синтез моделі та генерацію тестів. На першому етапі текстові вимоги проходять лінгвістичне передоброблення за допомогою бібліотеки spaCy, включно з токенизацією, лематизацією, частиномовним тегуванням та синтаксичним розбором залежностей. Подальші етапи алгоритму базуються на правилах і послідовно виконують розв'язання займенників, декомпозицію складних речень на елементарні кластери та виявлення ключових синтаксичних сутностей (дій, суб'єктів, об'єктів, порівнянь). На основі цих синтаксичних одиниць визначаються семантичні сутності, необхідні для побудови моделей взаємодії – актори, компоненти, сигнали, атрибути та стани. Після цього алгоритм автоматично формує текстове представлення вимог у вигляді елементів IRDL, яке може бути візуалізоване як UML sequence diagram. Згенеровані моделі потім використовуються для синтезу UML state machine та автоматичного генерування тестових сценаріїв. Загалом метод комбінує лінгвістичний аналіз зі спеціально визначеними правилами перетворення, забезпечуючи напівавтоматичну формалізацію природномовних вимог без використання методів машинного навчання.

### Методи машинного навчання з розпізнаванням іменованих сутностей.

Підходи на основі машинного навчання використовують алгоритми розпізнавання іменованих сутностей (NER) для автоматичного виявлення та класифікації ключових елементів у природномовних вимогах [8–10]. NER-моделі навчаються на анотованих корпусах, де кожен фрагмент тексту позначений відповідною роллю (сигнал, значення, дія, обмеження тощо).

У дослідженні Medeshetty NER використовується разом з класичними алгоритмами машинного навчання – SVM, Random Forest, Decision Tree, Gradient Boosting – для віднесення фрагментів тексту до відповідних типів сутностей [5]. За результатами експериментів найкращі показники демонструє SVM, досягаючи точності на рівні 77,3 % на тестовому наборі, тоді як інші алгоритми показують нижчі значення точності та F1-міри [5].

Переваги методів машинного навчання з NER:

- адаптивність до різних типів і форматів вимог за наявності відповідних анотованих корпусів;
- можливість донавчання моделей при надходженні нових даних;
- здатність обробляти складніші формати, де жорсткі правила важко сформулювати вручну;
- потенційна масштабованість до великих обсягів документації.

Недоліки:

- значна залежність від якості та обсягу навчальних даних;
- складність налаштування моделей для вузьких доменів;

У проаналізованому дослідженні загальна практична ефективність NER-підходу виявилася нижчою, ніж у правило-орієнтованого методу для простіших типів вимог [5].

Таким чином, NER-базовані методи доцільно розглядати як інструмент для сценаріїв, де формат вимог більш варіативний, але доступні достатньо великі й репрезентативні набори навчальних даних [8–10].

Окремий напрям пов'язаний з інтеграцією NER та інших технік обробки вимог із моделями приймального тестування. Wang та співавтори запропонували NLP-орієнтований підхід до автоматичної генерації acceptance-тестів із use case специфікацій, у якому вимоги спочатку структуруються, а потім перетворюються на формальні сценарії з умовами та очікуваними результатами [24]. Allala та ін. комбінують моделювання, кероване моделлю (MDSE), з NLP для побудови абстрактних тест-кейсів на основі користувацьких вимог, забезпечуючи трасованість між вимогами, моделями й тестами [25]. Такі роботи демонструють, що ML- та NLP-методи можуть ефективно поєднуватися з інженерією вимог, забезпечуючи більш тісний зв'язок між текстовими артефактами та тестовими сценаріями.

### Трансформерні моделі.

Сучасні трансформерні моделі є основою багатьох підходів до автоматизованої генерації коду та тестів. У контексті генерації тест-кейсів вони використовуються як у форматі спеціалізованих моделей (наприклад, ATHENATEST), так і у вигляді великих мовних моделей загального призначення [4, 6, 11, 12]. Ці моделі використовують архітектуру sequence-to-sequence та здатні генерувати тест-кейси навчаючись на великих корпусах реальних тестів написаних розробниками.

У роботі Tufano та співавторів запропоновано ATHENATEST – підхід, який навчається на реальних юніт-тестах, написаних розробниками, і генерує кандидатні тести для заданих «фокальних» методів [4]. Основні результати:

- згенеровано 25 000 коректних тестів, які автори публічно виклали у відкритий доступ;
- при генерації до 30 кандидатів на один метод ATHENATEST спроможна правильно протестувати 43 % фокальних методів, при цьому близько 16 % кандидатних тестів виявляються коректними;
- покриття коду, досягнуте ATHENATEST, є порівняним із EvoSuite і в окремих випадках перевищує його;
- за результатами опитування професійних розробників, тести, згенеровані ATHENATEST, сприймаються як більш читабельні, зрозумілі та ефективні порівняно з тестами EvoSuite [4].

Робота Albdeiwі присвячена застосуванню великих мовних моделей до задачі генерації тест-кейсів на основі текстових вимог [12]. Автор оцінює якість за допомогою:

- автоматичної метрики BLEU (до 32,93 для найкращої конфігурації),
- людської експертної оцінки (максимальна середня оцінка 3,71/4.68)[12].

Переваги трансформерних і LLM-підходів:

- здатність враховувати широкий контекст і семантику вимог;
- потенційно висока якість та різноманітність згенерованих сценаріїв;

- можливість адаптації до різних предметних областей за рахунок донавчання або підказкового програмування (prompting).

Обмеження:

- значні обчислювальні витрати на навчання й «інференс» великих моделей;
- потреба у якісних наборах даних для конкретних доменів;
- необхідність додаткових механізмів контролю коректності та повноти згенерованих тестів [11, 13].

Останні дослідження демонструють інтеграцію великих мовних моделей безпосередньо в процес requirements-driven тестування. Agora та співавтори запропонували RAGTAG — підхід до генерації тестових сценаріїв із двомовних (англійсько-німецьких) вимог із використанням Retrieval-Augmented Generation; результати промислового кейсу показали, що згенеровані сценарії є релевантними, зрозумілими для експертів і придатними до виконання на практиці [28]. Karmouda та співавтори досліджують застосування Claude 3.5 Sonnet для автоматичного виділення умовних тверджень із функціональних вимог і формування на їх основі тест-кейсів [29]. Узагальнений огляд застосування LLM у програмному тестуванні, включно з генерацією тестів, пріоритизацією та аналізом результатів, подано в роботі Wang та співавторів. [30], що підтверджує зростаючу роль трансформерних моделей як універсального інструменту підтримки QA-процесів.

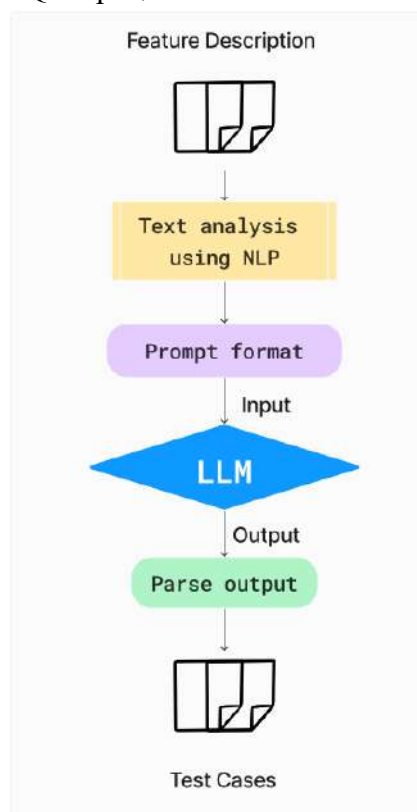


Рис. 3. Схема загального пайплайну генерації тест-кейсів за допомогою LLM  
Джерело: [12].

На рисунку 3 подано узагальнений конвеєр автоматичної генерації тест-кейсів на основі великих мовних моделей. Спочатку текстове описання функціональності проходить попередню обробку за допомогою методів NLP, після чого формуються інструкції та шаблон промпта. Отриманий промпт передається LLM, яка генерує первинний варіант тест-кейсів. Згенерований вихід додатково розбирається та структурується у формат тестової документації.

**Порівняльний аналіз підходів.***Таблиця 1 – Порівняння методів NLP*

| Підхід / Джерело                              | Технічна реалізація підходу                                        | Типові вхідні дані                 | Якісна оцінка результатів                                                                                                   | Переваги                                       | Обмеження                                                  | Тип генерованих тестів           |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Rule-based (Gröpler та ін. 2021)              | Лінгвістичний парсинг, POS-теги, dependency parsing, ручні правила | Текстові вимоги                    | Повнота: висока; коректність: висока; консистентність: дуже висока.                                                         | Інтерпретованість, низькі вимоги до даних      | Залежність від правил, чутливість до формулювань           | Абстрактні тест-кейси            |
| Rule-based vs NER (Medeshetty та ін., 2023)   | Rule-based патерн-матчинг; NER на SVM                              | 400 документів Polarion            | Rule-based: <b>висока</b> точність для простих випадків, <b>середня</b> для складніших; NER (SVM): – <b>висока</b> точність | Висока точність, скорочення ручної роботи      | NER потребує навчання; rule-based слабкі для складних фраз | Специфікації тест-кейсів для ECU |
| Transformer (ATHENATEST, Tufano та ін., 2021) | Seq2Seq BART; попереднє + supervised навчання                      | Java-код (фокальні методи) + тести | Покриття фокальних методів: <b>середній рівень</b> ; якість і корисність тестів – високий рівень.                           | Висока якість, наближеність до людських тестів | Потребує великих обчислювальних ресурсів                   | Юніт-тести                       |
| LLM (Albdeiwi та El-Khalil, 2024)             | LLM (Mistral-7B), prompt engineering, fine-tuning                  | Текстові специфікації              | BLEU: висока відповідність еталонним тестам.                                                                                | Працює на малих GPU, стабільність              | Залежність від промптів та обсягів даних                   | Текстові структуровані тести     |

Джерело: складено авторами на основі [3; 4; 5; 12].

Порівняльний аналіз в оглядовій Таблиці 1 показує, що сучасні підходи до автоматизованої генерації тест-кейсів на основі NLP суттєво відрізняються за рівнем формалізації, вимогами до ресурсів і характером результатів. Правило-орієнтовані методи (Gröpler; Medeshetty) демонструють високу точність у вузьких доменах та забезпечують передбачуваність і інтерпретованість, але потребують ручного налаштування правил і погано масштабуються на складні або неоднорідні вимоги. Підходи на основі NER і класичних ML-моделей показують помірну точність і вимагають анотованих даних, проте здатні частково зменшувати залежність від жорстких шаблонів.

Методи, що використовують трансформерні моделі (Tufano; Albdeiwi), досягають значно вищої гнучкості у роботі з текстом і демонструють кращу відповідність людським прикладам – як за покриттям, так і за експертними оцінками якості. ATHENATEST підтверджує здатність моделей Seq2Seq генерувати тест-кейси, близькі до таких, які пишуть розробники, а LLM-підходи дозволяють отримувати якісні текстові тест-кейси навіть на відносно обмежених обчислювальних ресурсах.

**Висновки.** Проведений у статті аналіз дозволив систематизувати три основні підходи до автоматизованого генерування тест-кейсів на основі природномовних вимог та узагальнити їх методологічні особливості. На відміну від існуючих робіт, у дослідженні структуровано послідовність перетворення вимог у тестові сценарії та окреслено ключові фактори, що впливають на ефективність обраного підходу. Практична цінність роботи полягає в можливості застосування отриманих узагальнень для обґрунтованого вибору інструментів і методів у процесі автоматизації тест-дизайну. Порівняння показало, що правило-орієнтовані методи доцільні для проєктів зі стабільними вимогами, алгоритми машинного навчання – для середовищ зі змінною структурою вимог, а трансформерні моделі – для комплексних систем із великим обсягом текстових даних. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення гібридних підходів, удосконалення методів попередньої обробки вимог та адаптацію сучасних моделей до специфічних предметних областей. Отримані узагальнення можуть слугувати практичними рекомендаціями для вибору підходу залежно від типу проєкту.

**Список використаних джерел**

1. Макуховська Д.А. (2025) Моделі тестування при розробці web-платформи для обміну 3D-моделлями. *Вісник ХНТУ*, (3), 45–52.
2. Boukhelif, M., Hanine, M., Kharmoum, N., Ruigómez Noriega, A., García Obeso, D., & Ashraf, I. (2024). Natural Language Processing-Based Software Testing: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 12, 43132–43154. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3407753>
3. Gröpler, R., Sudhi, V., García, E. J. C., & Bergmann, A. (2021). NLP-Based Requirements Formalization for Automatic Test Case Generation. *CEUR Workshop Proceedings*, (Vol. 2951). <https://ceur-ws.org/Vol-2951/paper15.pdf>.
4. Tufano, M., Drain, D., Svyatkovskiy, A., Deng, S. K., & Sundaresan, N. (2020). Unit Test Case Generation with Transformers and Focal Context. *arXiv preprint arXiv:2009.05617*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.05617>.
5. Medeshetty, N., et al. (2025). From Requirements to Test Cases: An NLP-Based Approach for High-Performance ECU Test Case Automation. *arXiv preprint arXiv:2505.00547*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.00547>.
6. Shakthi, S., Srivastava, P., Kumar, R. L., & Prasad, S. G. (2024). Automated Test Case Generation for Satellite FRD Using NLP and Large Language Model. *4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECCME62383.2024.10796866>.
7. Kumar, S., Napte, K., Rani, R., Pippal, S. K. (2025). A method for IoT devices test case generation using language models. *MethodsX*, 14, 103340. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103340>.
8. Mahalakshmi, G. S., Vani, V., & Antony, B. (2018). Named Entity Recognition for Automated Test Case Generation. *The International Arab Journal of Information Technology*, 15(1), 112–120. <https://www.iajit.org/paper/3691>.
9. Malik, G., Cevik, M., Khedr, Y., Parikh, D., Başar, A. (2021). Named Entity Recognition on Software Requirements Specification Documents. *34th Canadian Conference on Artificial Intelligence (Canadian AI 2021)*. <https://doi.org/10.21428/594757db.507e7951>.
10. Celik, A., & Mahmoud, Q. H. (2025). A Review of Large Language Models for Automated Test Case Generation. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(3), 97. <https://doi.org/10.3390/make7030097>.
11. Korrapolu, B. R., Pinninti, P., Reddy, Y. R. (2025). Test Case Generation for Requirements in Natural Language – An LLM Comparison Study. *18th Innovations in Software Engineering Conference (ISEC 2025)*. <https://doi.org/10.1145/3717383.3717389>.
12. Albdeiwi, Y. (2024). Generating Test Cases Using Natural Language Processing. Master's thesis, Lund University. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9168588>.
13. Iznaga, Y. S., Rato, L., Salgueiro, P., & León, J. L. (2025). Integrating Large Language Models into Automated Software Testing. *Future Internet*, 17(10), 476. <https://doi.org/10.3390/fi17100476>.
14. Mustafa, A., Wan-Kadir, W. M. N., Ibrahim, N., Shah, M. A., Younas, M., et al. (2021). Automated Test Case Generation from Requirements: A Systematic Literature Review. *Computers, Materials & Continua*, 67(2), 1819–1833. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.014391>.
15. Farooq, M. S., & Tahreem, T. (2022). Requirement-Based Automated Test Case Generation: Systematic Literature Review. *VFAST Transactions on Software Engineering*, 10(2), 133–142. <https://doi.org/10.21015/vtse.v10i2.940>.
16. Garousi, V., Bauer, S., & Felderer, M. (2020). NLP-assisted software testing: A systematic mapping of the literature. *Information and Software Technology*, 126, 106321. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106321>.
17. Ayenew, H., & Wagaw, M. (2024). Software Test Case Generation Using Natural Language Processing (NLP): A Systematic Literature Review. *Artificial Intelligence Evolution*, 5(1), 35–56. <https://doi.org/10.37256/aie.5120243220>.
18. Navarro Calizaya, J., & Ibarra, R. (2025). Automatic test case generation using natural language processing: A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, 189, 107929. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107929>.



19. Dwarakanath, A., & Sengupta, B. (2012). Litmus: Generation of Test Cases from Functional Requirements in Natural Language. *Natural Language to Information Systems (NLDB 2012)*, (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7337). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31178-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31178-9_6).
20. Santiago Júnior, V., & Vijaykumar, N. (2012). Generating Model-Based Test Cases from Natural Language Requirements for Space Application Software. *Software Quality Journal*, 20(1), 77–143. <https://doi.org/10.1007/s11219-011-9155-6>.
21. Carvalho, G., Falcão, D., Barros, F. A., Blackburn, M. R. (2014). NAT2TEST(SCR): Test Case Generation from Natural Language Requirements Based on SCR Specifications. *Science of Computer Programming*, 95, 275–297. <https://doi.org/10.1145/2480362.2480591>.
22. Sarmiento, E., Leite, J. C. S. P., Almentero, E., & Alzamora, G. S. (2016). Test Scenario Generation from Natural Language Requirements Descriptions based on Petri-Nets. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 329, 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2016.12.008>.
23. Silva, B. C. F., Carvalho, G., & Sampaio, A. (2019). CPN Simulation-Based Test Case Generation from Controlled Natural-Language Requirements. *Science of Computer Programming*, 181, 111–139. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2019.04.001>.
24. Wang, C., Pastore, F., Goknil, A., & Briand, L. C. (2020). Automatic Generation of Acceptance Test Cases from Use Case Specifications: An NLP-Based Approach. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(2), 585–616. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.08490>.
25. Allala, S. Ch., Sotomayor, J. P., Santiago, D., King, T. M., & Clarke, P. J. (2022). Generating Abstract Test Cases from User Requirements Using MDSE and NLP. *2022 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)* (c. 138-147). IEEE. <https://doi.org/10.1109/QRS57517.2022.00080>.
26. Vani, V., & Mahalakshmi, G. S. (2015). Generation of Patterns for Test Cases. *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)* (c. 526-531). IEEE. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i24/80176>.
27. Chioasca, E.-V., Zhao, L., Alhoshan, W., & Ferrari, A. (2020). Natural Language Processing (NLP) for Requirements Engineering: A Systematic Mapping Study. *Proceedings of the 17th International Conference on Mining Software Repositories* (c. 391–405). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.01099>.
28. Arora, C., Herda, T., & Homm, V. (2024). Generating Test Scenarios from NL Requirements Using Retrieval-Augmented LLMs: An Industrial Study. *32nd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2024)* (c. 240–251). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.12772>.
29. Karmouda, O., Ghaouat, M., & Feuilloley, G. (2025). Automated Test Case Generation from Natural Language Requirements Using Large Language Models. *Future Technologies Conference (FTC 2025)* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1677, c. 260–281). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07995-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07995-4_18).
30. Wang, J., Huang, Y., Chen, C., Liu, Z., Wang, S., & Wang, Q. (2024). Software Testing with Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 50(4), 911–936. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.07221>.

## References

1. Makukhovska, D. A. (2025). Modeli testuvannia pry rozrobttsi web-platfomy dlia obminu 3D-modeliamy [Testing models in the development of a web platform for sharing 3D models]. *Visnyk KhNTU – Bulletin of KhNTU*, (3), 45–52.
2. Boukhilif, M., Hanine, M., Kharmoum, N., Ruigómez Noriega, A., García Obeso, D., & Ashraf, I. (2024). Natural Language Processing-Based Software Testing: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 12, 43132–43154. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3407753>
3. Gröpler, R., Sudhi, V., García, E. J. C., & Bergmann, A. (2021). NLP-Based Requirements Formalization for Automatic Test Case Generation. *CEUR Workshop Proceedings*, (Vol. 2951). <https://ceur-ws.org/Vol-2951/paper15.pdf>.
4. Tufano, M., Drain, D., Svyatkovskiy, A., Deng, S. K., & Sundaresan, N. (2020). Unit Test Case Generation with Transformers and Focal Context. *arXiv preprint arXiv:2009.05617*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.05617>.
5. Medeshetty, N., et al. (2025). From Requirements to Test Cases: An NLP-Based Approach for High-Performance ECU Test Case Automation. *arXiv preprint arXiv:2505.00547*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.00547>.



6. Shakthi, S., Srivastava, P., Kumar, R. L., & Prasad, S. G. (2024). Automated Test Case Generation for Satellite FRD Using NLP and Large Language Model. *4th International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*. (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECCME62383.2024.10796866>.
7. Kumar, S., Napte, K., Rani, R., Pippal, S. K. (2025). A method for IoT devices test case generation using language models. *MethodsX*, 14, 103340. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103340>.
8. Mahalakshmi, G. S., Vani, V., & Antony, B. (2018). Named Entity Recognition for Automated Test Case Generation. *The International Arab Journal of Information Technology*, 15(1), 112–120. <https://www.iajit.org/paper/3691>.
9. Malik, G., Cevik, M., Khedr, Y., Parikh, D., Başar, A. (2021). Named Entity Recognition on Software Requirements Specification Documents. *34th Canadian Conference on Artificial Intelligence (Canadian AI 2021)*. <https://doi.org/10.21428/594757db.507e7951>.
10. Celik, A., & Mahmoud, Q. H. (2025). A Review of Large Language Models for Automated Test Case Generation. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(3), 97. <https://doi.org/10.3390/make7030097>.
11. Korrapolu, B. R., Pinninti, P., Reddy, Y. R. (2025). Test Case Generation for Requirements in Natural Language – An LLM Comparison Study. *18th Innovations in Software Engineering Conference (ISEC 2025)*. <https://doi.org/10.1145/3717383.3717389>.
12. Albdeiwi, Y. (2024). Generating Test Cases Using Natural Language Processing. Master's thesis, Lund University. <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/9168588>.
13. Iznaga, Y. S., Rato, L., Salgueiro, P., & León, J. L. (2025). Integrating Large Language Models into Automated Software Testing. *Future Internet*, 17(10), 476. <https://doi.org/10.3390/fi17100476>.
14. Mustafa, A., Wan-Kadir, W. M. N., Ibrahim, N., Shah, M. A., Younas, M., et al. (2021). Automated Test Case Generation from Requirements: A Systematic Literature Review. *Computers, Materials & Continua*, 67(2), 1819–1833. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.014391>.
15. Farooq, M. S., & Tahreem, T. (2022). Requirement-Based Automated Test Case Generation: Systematic Literature Review. *VFAST Transactions on Software Engineering*, 10(2), 133–142. <https://doi.org/10.21015/vtse.v10i2.940>.
16. Garousi, V., Bauer, S., & Felderer, M. (2020). NLP-assisted software testing: A systematic mapping of the literature. *Information and Software Technology*, 126, 106321. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106321>.
17. Ayenew, H., & Wagaw, M. (2024). Software Test Case Generation Using Natural Language Processing (NLP): A Systematic Literature Review. *Artificial Intelligence Evolution*, 5(1), 35–56. <https://doi.org/10.37256/aie.5120243220>.
18. Navarro Calizaya, J., & Ibarra, R. (2025). Automatic test case generation using natural language processing: A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, 189, 107929. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107929>.
19. Dwarakanath, A., & Sengupta, B. (2012). Litmus: Generation of Test Cases from Functional Requirements in Natural Language. *Natural Language to Information Systems (NLDB 2012)*, (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7337). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-31178-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-31178-9_6).
20. Santiago Júnior, V., & Vijaykumar, N. (2012). Generating Model-Based Test Cases from Natural Language Requirements for Space Application Software. *Software Quality Journal*, 20(1), 77–143. <https://doi.org/10.1007/s11219-011-9155-6>.
21. Carvalho, G., Falcão, D., Barros, F. A., Blackburn, M. R. (2014). NAT2TEST(SCR): Test Case Generation from Natural Language Requirements Based on SCR Specifications. *Science of Computer Programming*, 95, 275–297. <https://doi.org/10.1145/2480362.2480591>.
22. Sarmiento, E., Leite, J. C. S. P., Almentero, E., & Alzamora, G. S. (2016). Test Scenario Generation from Natural Language Requirements Descriptions based on Petri-Nets. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 329, 123–148. <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2016.12.008>.
23. Silva, B. C. F., Carvalho, G., & Sampaio, A. (2019). CPN Simulation-Based Test Case Generation from Controlled Natural-Language Requirements. *Science of Computer Programming*, 181, 111–139. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2019.04.001>.
24. Wang, C., Pastore, F., Goknil, A., & Briand, L. C. (2020). Automatic Generation of Acceptance Test Cases from Use Case Specifications: An NLP-Based Approach. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 48(2), 585–616. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.08490>.

25. Allala, S. Ch., Sotomayor, J. P., Santiago, D., King, T. M., & Clarke, P. J. (2022). Generating Abstract Test Cases from User Requirements Using MDSE and NLP. *2022 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)* (с. 138-147). IEEE. <https://doi.org/10.1109/QRS57517.2022.00080>.
26. Vani, V., & Mahalakshmi, G. S. (2015). Generation of Patterns for Test Cases. *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)* (с. 526-531). IEEE. <https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i24/80176>.
27. Chioasca, E.-V., Zhao, L., Alhoshan, W., & Ferrari, A. (2020). Natural Language Processing (NLP) for Requirements Engineering: A Systematic Mapping Study. *Proceedings of the 17th International Conference on Mining Software Repositories* (с. 391-405). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.01099>.
28. Arora, C., Herda, T., & Homm, V. (2024). Generating Test Scenarios from NL Requirements Using Retrieval-Augmented LLMs: An Industrial Study. *32nd IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2024)* (с. 240-251). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.12772>.
29. Karmouda, O., Ghaouat, M., & Feuilloley, G. (2025). Automated Test Case Generation from Natural Language Requirements Using Large Language Models. *Future Technologies Conference (FTC 2025)* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1677, с. 260-281). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-07995-4\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-032-07995-4_18).
30. Wang, J., Huang, Y., Chen, C., Liu, Z., Wang, S., & Wang, Q. (2024). Software Testing with Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 50(4), 911-936. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.07221>.

Дата першого надходження статті до видання: 08.10.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.11.2025

UDC 004.8:004.4

**Oleksii Maksymov<sup>1</sup>, Dmytro Lysenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [maksimov98gmy@gmail.com](mailto:maksimov98gmy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4257-6549>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information and Computer Systems,  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [lysenko.d@stu.cn.ua](mailto:lysenko.d@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6870-6120>

## COMPARATIVE ANALYSIS OF NATURAL LANGUAGE PROCESSING METHODS FOR AUTOMATED TEST CASE GENERATION

*The article addresses the problem of systematizing existing NLP-based approaches used for automated test case generation. Despite the availability of different methods, there is still a lack of comprehensive comparison that would highlight their conceptual differences, and limitations. The need to clarify the structure of these approaches and evaluate their suitability for various software domains forms the core motivation of the presented research.*

*The objective of the article is to provide an integrated comparative overview of three main groups of methods: rule-based approaches, machine-learning techniques relying on named entity recognition, and approaches based on transformer models. The article aims to describe the methodological foundations of each group, the stages of processing natural-language requirements, and the typical workflow of transforming textual input into test scenarios.*

*The main part of the article outlines the structure of automated test case generation using NLP, including the extraction of key entities, identification of system actions and conditions, and formation of steps for test scenarios. Each methodological group is described in terms of its internal principles, linguistic processing techniques, adaptability to different formats of requirements, and dependence on training data. Special attention is paid to the role of preprocessing, domain specificity, rule formulation, annotation needs in machine-learning methods, and the modelling capabilities of transformer-based architectures. A comparative description summarizes their conceptual differences, strengths, and potential limitations.*

*The conclusions generalize the findings of the analysis, emphasizing the importance of selecting an appropriate NLP method depending on the requirements. The material presented in the article can be used as a methodological basis for choosing or developing NLP-based tools for automated test design in software projects.*

**Keywords:** natural language processing; automated testing; test case generation; machine learning; optimization; software quality.

Fig.: 3. Table: 1. References: 30.

**Богдан Миколайович Пархоменко<sup>1</sup>, Максим Валерійович Міщенко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії,  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [bparkhomenko@stu.cn.ua](mailto:bparkhomenko@stu.cn.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1279-4981>

<sup>2</sup>доктор філософії зі спеціальності «Комп'ютерні науки»,  
викладач кафедри інформаційних технологій та програмної інженерії  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)  
E-mail: [max.mishchenko771@gmail.com](mailto:max.mishchenko771@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9769-9759>

## **ЗАСТОСУВАННЯ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ВЕЛИКОГО МАСШТАБУ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗАГОЛОВКІВ ТА ФОРМУВАННЯ РОЗШИРЕНИХ ОЗНАК У ПРОГНОЗУВАННІ ФІНАНСОВИХ РИНКІВ**

*Стаття є оглядово-інформаційним викладом матеріалу щодо використання сучасних мовних моделей великого масштабу для аналізу заголовків фінансових новин та формування індексу інформаційного настрою з метою покращення якості фінансових даних і підвищення точності подальшого прогнозування показників. В умовах зростання обсягів неструктурованої інформації та підвищеної динамічності фінансових ринків традиційні методи аналізу дедалі частіше виявляються недостатньо ефективними, що зумовлює необхідність застосування інтелектуальних інформаційних моделей. Поєднання глибокого семантичного аналізу текстових даних із методами машинного навчання забезпечує можливість розширення наборів ознак, збагачення вхідних даних та підвищення інформативності фінансових часових рядів.*

*На основі отриманих числових оцінок тональності будується коефіцієнт інформаційного настрою, який агрегує вплив інформаційного фону за певний часовий період та інтегрується у фінансові ряди як додаткова характеристика. Такий підхід дозволяє враховувати не лише історичну цінову динаміку, а і якісні аспекти інформаційного середовища, що впливають на поведінку учасників ринку та формування ринкових очікувань. Запропонований індекс може використовуватися як допоміжний індикатор для аналізу трендових змін і підсилення прогнозних моделей.*

*Використання запропонованих методів сприяє виявленню прихованих залежностей між інформаційним фоном та ринковими показниками, що є особливо важливим в умовах високої волатильності та невизначеності фінансових систем. Окрему увагу приділено питанням інтерпретованості отриманих результатів та стабільності побудованого індексу при зміні параметрів агрегації. На основі проведеного аналізу визначаються основні напрями подальшого удосконалення підходів до формування інформаційних індексів, а також можливості практичного застосування отриманих результатів у діяльності фінансових аналітиків та при побудові моделей прогнозування фінансових часових рядів.*

**Ключові слова:** мовні моделі; машинне навчання; фінансова аналітика; інформаційні моделі; прийняття рішень.  
Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Використання сучасних мовних моделей великого масштабу для аналізу заголовків фінансових новин є актуальним в умовах зростання кількості доступної інформації, що впливає на поведінку учасників ринку та формування цінових трендів. Традиційні методи обробки текстів втрачають ефективність через складність інтерпретації фінансової інформації та швидкості її оновлення. Застосування підходів, заснованих на LLM, дозволяє точніше оцінювати інформаційний фон ринку та підтримувати процес прийняття рішень.

Дослідження має важливе значення для фінансової аналітики, оскільки формування індексу інформаційного настрою створює можливість розширення наборів ознак і покращення якості прогнозування. Використання таких інструментів підвищує адаптивність аналітичних моделей у періоди волатильності та турбулентності ринку. Подальший розвиток методів аналізу відкриває нові перспективи для підвищення ефективності управління інвестиціями.

**Постановка проблеми.** У зв'язку зі стрімким зростанням обсягів інформації та збільшенням впливу новинних потоків на фінансові ринки виникає необхідність розробки ефективних методів аналізу текстових даних, які можуть бути використані для покращення фінансових прогнозів. Традиційні алгоритми обробки текстів не здатні повною мірою врахувати контекст, динамічність та багатозначність заголовків фінансових новин, що обмежує їхню ефективність у задачах прогнозування.

Особливо важливою проблема стає для галузі фінансової аналітики та інвестування, де точність інтерпретації інформаційного фону ринку безпосередньо впливає на ухвалення рішень. Використання сучасних мовних моделей великого масштабу дозволяє значно підвищити якість аналізу текстових даних та створити нові інформаційні коефіцієнти, що розширюють можливості існуючих прогностичних моделей. Це набуває особливої актуальності в умовах ринкової невизначеності, де швидкий і точний аналіз настроїв може забезпечити суттєву аналітичну перевагу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Упродовж останніх років зростає кількість робіт, присвячених застосуванню мовних моделей великого масштабу для обробки фінансових текстів та покращення аналітичних процесів. Сучасні LLM демонструють високу ефективність у визначенні семантичних характеристик та тональності фінансових повідомлень, що робить їх перспективними для використання в задачах прогнозування. Водночас дослідження вказують на низку проблем, серед яких – складність побудови універсальних моделей, здатних стабільно працювати на різномірних фінансових даних, а також залежність результатів від якості текстових джерел та методів їх попередньої обробки [1].

Окремий напрям становлять роботи, спрямовані на створення спеціалізованих фінансових мовних моделей, які демонструють вищу точність у задачах сентимент-аналізу та інтерпретації ринкових новин. Такі моделі покращують результати аналізу, проте їх використання потребує ретельного налаштування та адаптації до певного типу текстових даних [2].

У новітніх дослідженнях набувають поширення ансамблеві підходи, де поєднання декількох мовних моделей дозволяє підвищити точність оцінювання настроїв ринку та знизити вплив окремих помилок класифікації. Такі методи демонструють перспективність, але не завжди враховують специфіку заголовків новин та особливості їх використання у формуванні інтегральних індексів інформаційного настрою [3].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри значний прогрес у застосуванні мовних моделей для аналізу фінансових текстів, залишається низка аспектів, що вивчені недостатньо. Однією з ключових проблем є відсутність сталих методик формування індексів інформаційного настрою саме на основі заголовків новин, які є короткими, динамічними та часто містять концентровані ринкові сигнали.

Недостатньо досліджено також вплив запитів на отримані результати, оскільки якість запиту до мовної моделі безпосередньо визначає точність та стабільність оцінок тональності. У більшості робіт процес побудови промптів описано частково, що ускладнює відтворюваність результатів. Крім того, питання узгоджування оцінок, отриманих різними моделями, залишаються відкритими.

Таким чином, потребують додаткового вивчення методи аналізу коротких текстів - заголовків як швидкодоступного інформаційного потоку, а також побудова ефективних коефіцієнтів настрою, які можуть бути інтегровані у фінансові дані для подальшого покращення прогнозування.

**Метою статті** є дослідження використання сучасних мовних моделей великого масштабу для аналізу заголовків фінансових новин, розробка підходів до їхнього промптингу та формування коефіцієнта інформаційного настрою, що може бути інтегрований у фінансові дані з метою покращення їхньої інформативності й підвищення точності подальших прогнозів.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасний розвиток штучного інтелекту та стрімке збільшення обсягів доступної інформації зумовлюють необхідність використання більш гнучких і точних методів для аналізу фінансових даних. Особливо це стосується текстових даних, які відіграють ключову роль у формуванні ринкових очікувань та поведінки інвесторів. Новини, аналітичні огляди та повідомлення про корпоративні події створюють складний інформаційний фон, який традиційні статистичні методи більше не в змозі

ефективно інтерпретувати [4]. Саме тому у фінансових дослідженнях усе ширше застосовуються мовні моделі великого масштабу (LLM), здатні аналізувати контекстуальні залежності та виявляти приховані семантичні зв'язки в текстах.

У цьому дослідженні для класифікації тональності фінансових заголовків застосовано модель RoBERTa, адаптовану для коротких текстових повідомлень. Обрана модель демонструє високу ефективність у визначенні позитивної, нейтральної чи негативної тональності завдяки попередньому навчанню на великому корпусі коротких новинних та соціальних повідомлень, де лінгвістична структура подібна до фінансових заголовків [5]. Її перевагами є здатність працювати без додаткового донавчання, висока стійкість до шумних даних і доступність у вигляді відкритої моделі, що дозволяє проводити дослідження без значних обчислювальних витрат.

Використання LLM є ключовим елементом процесу побудови індексу інформаційного настрою  $S_t$ :

$$S_t = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} \omega_i * sentiment(T_i)}{\sum_{i=1}^{N_t} \omega_i},$$

де  $T_i$  – окреме текстове повідомлення отримане в момент часу  $t$ ;

$sentiment(T_i)$  – числова оцінка тональності тексту;

$\omega_i$  – ваговий коефіцієнт для кожного тексту, який може враховувати авторитетність джерела, кількість переглядів, поширень або іншу релевантність;

$N_t$  – загальна кількість текстів за розглянутий проміжок часу;

$S_t$  – узагальнений індекс інформаційного настрою, який характеризує тон інформаційного середовища в момент часу  $t$ .

Для формування кількісного індексу інформаційного настрою використовується структурований набір даних, який містить заголовки фінансових новин, відповідні дати їхніх публікації та тикери компаній, до яких ці новини належать [6]. Приклад даних наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Приклад вхідних даних із заголовками новин

| Новина                                                                                    | Дата       | Індекс компанії |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|
| B of A Securities Maintains Neutral on Agilent Technologies, Raises Price Target to \$88" | 2020-05-22 | A               |
| CFRA Maintains Hold on Agilent Technologies, Lowers Price Target to \$85                  | 2020-05-22 | A               |

Джерело: розроблено автором на основі даних з kaggle.com.

Такий формат дозволяє пов'язати інформаційні повідомлення з конкретними активами та формувати часові ряди, що відображають зміни інформаційного фону для окремих акцій. Заголовки очищуються від технічних символів і повторів, після чого кожне повідомлення подається на вхід мовної моделі для визначення його емоційного забарвлення [7]. Модель повертає значення тональності в діапазоні від -1 до +1, де негативні значення відповідають негативному настрою, позитивні - позитивному, а нуль відображає нейтральний інформаційний контекст. У табл. 2 наведено приклад отриманого показника.

Таблиця 2 – Приклад вихідних даних мовної моделі

| Новина                                                                                    | Дата       | Індекс компанії | Сентимент |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------|-----------|
| B of A Securities Maintains Neutral on Agilent Technologies, Raises Price Target to \$88" | 2020-05-22 | A               | 0.106340  |
| CFRA Maintains Hold on Agilent Technologies, Lowers Price Target to \$85                  | 2020-05-22 | A               | 0.021060  |

Джерело: розроблено автором на основі даних з kaggle.com.

На основі отриманих значень формується добовий індекс інформаційного настрою  $S_t$ , який обчислюється як середнє значення тональності всіх заголовків за певний день. Оскільки на початковому етапі дослідження всі заголовки вважаються рівнозначними за важливістю, для кожного повідомлення встановлюється вага  $\omega_i = 1$ . Це дозволяє уникнути упередженості на ранній стадії обробки даних і забезпечує чисту оцінку базового впливу інформаційного фону без введення додаткових параметрів. Використання рівних ваг є також доцільним у випадку, коли заголовки мають подібну структуру і приблизно однакову інформаційну насиченість.

Після агрегації формується часовий ряд, який описує зміну загального тону новин щодо кожної компанії. Такий індекс можна подальше інтегрувати до фінансових даних як додатковий зовнішній фактор, що відображає інформаційний стан ринку.

На рис. 1 подано часову динаміку індексу інформаційного настрою  $S_t$  для акцій AAPL, сформованого на основі щоденних значень тональності новин. Синя лінія відображає фактичні значення індексу за кожний торговий день, що дозволяє оцінити короткострокові коливання інформаційного фону. Як видно з графіка, значення  $S_t$  демонструють значну варіативність протягом вибраного періоду, що зумовлено різною інтенсивністю новинного потоку та змінністю тону повідомлень, пов'язаних із діяльністю компанії.

Помаранчева пунктирна лінія представляє згладжене значення індексу, отримане за допомогою 7-денного ковзного середнього. Така фільтрація дозволяє виділити середньостроковий тренд інформаційного настрою, зменшивши вплив випадкових коливань і окремих аномальних значень. Порівняння обох кривих демонструє, що незважаючи на локальні коливання, загальний інформаційний фон має схильність до формування плавних фаз зростання або зниження, що може бути ознакою зміни ринкових очікувань та інвестиційної активності.

Таким чином, графік демонструє, що індекс інформаційного настрою є динамічним показником, який чутливо реагує на зміни в новинному просторі та відображає коротко- і середньострокові коливання ринкових очікувань, що робить його корисним доповненням до традиційних фінансових індикаторів.



Рис. 1. Графік індексу інформаційного настрою для індексу компанії AAPL

На наступному рис. 2 подано графік порівняння індексу інформаційного настрою  $S_t$  із динамікою ціни закриття акцій AAPL за той самий період. Можна побачити взаємозв'язок між інформаційним фоном та фактичними ринковими змінами, оскільки ці дві величини відображають різні аспекти поведінки учасників ринку. Синя лінія демонструє значення індексу  $S_t$ , що відображають тональність новинних повідомлень, тоді як червона лінія репрезентує ціну закриття, яка є інтегральним показником ринкових очікувань та реакцій на зовнішні події.



Аналіз показує, що попри значні короткострокові коливання значень  $S_t$ , загальна структура кривої має певні елементи кореляції з динамікою ціни закриття. Періоди підвищення індексу позитивного настрою часто супроводжуються плавним зростанням ціни, тоді як зниження інформаційного фону нерідко передуює невеликим локальним корекціям. Хоча ці зв'язки не завжди є синхронними, графік демонструє наявність тенденцій, які можуть свідчити про відкладений ефект впливу інформаційного середовища на ринкові рухи.

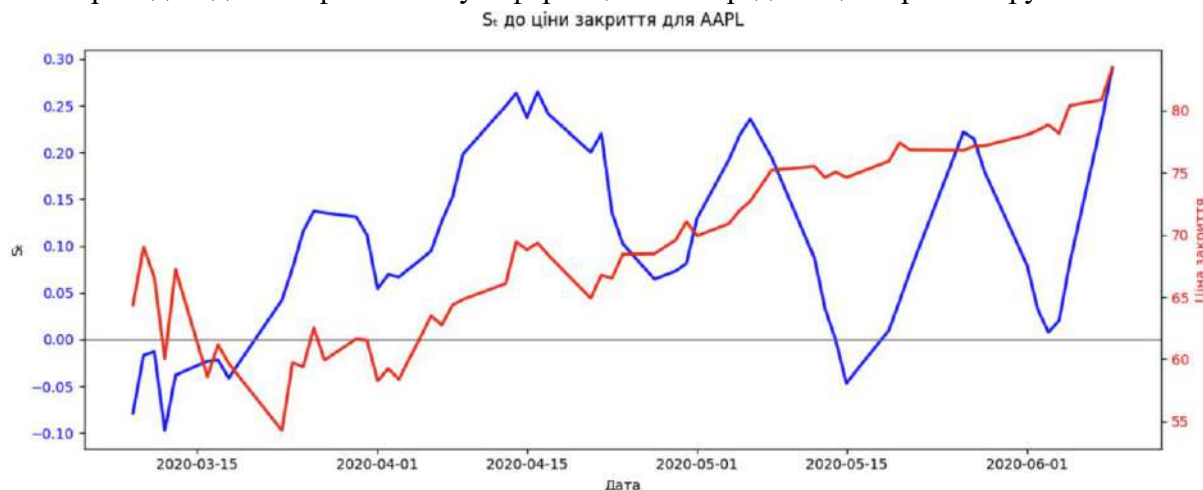


Рис. 2. Графік індексу інформаційного настрою для індексу компанії AAPL та ціни акцій

Особливої уваги заслуговує той факт, що значні коливання  $S_t$ , пов'язані з появою окремих новин, що здатні формувати середньострокові очікування на ринку. Такі інформаційні імпульси не завжди одразу відображаються в ціні, однак можуть створювати передумови для подальших трендових змін. Це узгоджується з попередніми спостереженнями щодо необхідності використання ковзних середніх та лагових значень індексу, оскільки ринок часто реагує на інформацію не миттєво, а з певною затримкою. Завдяки поданій візуалізації стає очевидно, що індекс інформаційного настрою може виступати додатковим індикатором для розуміння ринкових процесів.

На наступному рисунку 3 подано порівняльний аналіз коефіцієнтів кореляції Спірмена між різними модифікаціями індексу інформаційного настрою та ціною закриття акцій.

Відповідно до проведених обчислень, короткострокове 7-денне згладжування індексу  $S_{t\_roll7}$  демонструє помірну кореляцію на рівні близько 0.47. Подібні значення спостерігаються і для лагових індексів, зміщених на один, два та три дні. Це підтверджує наявність стабільного, хоча й не миттєвого зв'язку між інформаційним настроєм та ринковою динамікою. Важливо зазначити, що відносна стабільність кореляцій у межах кількох лагів узгоджується з природою реакції ринку на інформацію: новини не завжди одразу відображаються у ціні, і для формування ринкової відповіді може знадобитися певний час.

Більш виражені залежності спостерігаються при застосуванні довших інтервалів згладжування. Для 14-денного середнього кореляція зростає до значення 0.51, що свідчить про узгодженість між середньостроковим інформаційним тлом та загальним трендом ціни акцій. Найбільш показовою є кореляція між ціною закриття та 30-денним згладженим індексом  $S_{t\_roll30}$ , яка досягає величини 0.89. Таке значення фактично вказує на дуже високий рівень лінійного зв'язку, що є нетипово сильним для фінансових часових рядів. Це дозволяє стверджувати, що тривалий кумулятивний інформаційний фон має значний вплив на поведінку ринку та може виступати важливим предиктором у моделях прогнозування цінових трендів.

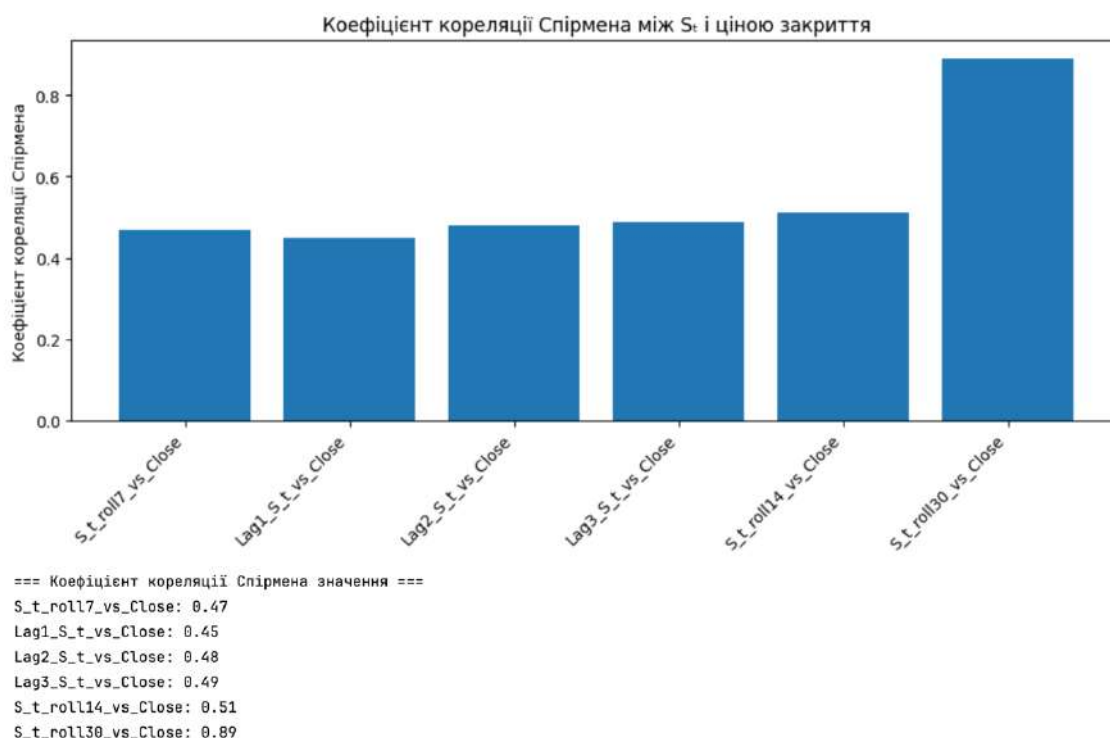


*Рис.3. Розрахунок коефіцієнтів кореляції Спірмена між модифікаціями індексу інформаційного настрою та ціною закриття акцій*

Таким чином, аналіз представленого графіка однозначно свідчить про значну інформативність індексу інформаційного настрою у довгостроковому вимірі. Його сильний зв'язок з ціною закриття при збільшенні вікна згладжування вказує на те, що інформаційний фон здатен акумулювати ефект новин і формувати стабільні ринкові тренди. Це робить індекс перспективним інструментом для інтеграції у моделі машинного навчання, де він може використовуватись як предиктор майбутніх цінових рухів, а також як додатковий фактор при дослідженні поведінки інвесторів та динаміки ринкових очікувань.

**Висновок.** Проведене дослідження демонструє, що застосування сучасних мовних моделей великого масштабу для аналізу фінансових заголовків є ефективним підходом до формування кількісних індикаторів інформаційного середовища. Використання LLM дало можливість отримати числові оцінки тональності новинних повідомлень, які згодом були агреговані у добовий індекс інформаційного настрою  $S_t$ . Побудований індекс відображає динаміку інформаційного фону та виявляє чутливість до різких змін у новинному потоці, зберігаючи при цьому чіткі середньострокові тенденції.

Порівняння  $S_t$  з ціною закриття показало наявність низки важливих закономірностей. Короткострокові коливання індексу суттєво відрізняються за амплітудою та часто містять високочастотні коливання, спричинені локальними новинними подіями. Проте згладжені значення  $S_t$  демонструють стійкі тренди, які співпадають з розвитком ринкової динаміки. Це відображено на графіках, де індекс настрою та ціна закриття змінюються у схожих часових фазах, що свідчить про наявність статистичного зв'язку між інформаційним фоном і поведінкою акцій.

Кореляційний аналіз підтвердив ці спостереження. Коефіцієнти Спірмена для коротких вікон і лагових значень знаходяться на рівні 0.44–0.49, що можна розглядати як помірний прямий зв'язок. Значно сильніша кореляція спостерігається при збільшенні періоду згладжування. Для 14-денного вікна кореляція підвищується до 0.51, а використання



30-денного індикатора демонструє надзвичайно високе значення — 0.89. Така узгодженість свідчить, що довгостроковий інформаційний фон є вагомим носієм ринкових очікувань і може застосовуватися як трендовий індикатор. Натомість кореляції між  $S_t$  і короткостроковою доходністю залишаються низькими, що узгоджується з природою фінансових ринків, де доходність формується під впливом багатьох випадкових факторів.

Отримані результати підтверджують перспективність інтеграції індексу інформаційного настрою до моделей машинного навчання для прогнозування фінансових часових рядів. Завдяки поєднанню семантичних можливостей LLM та методів статистичної обробки даних індекс здатен підсилювати прогнозні моделі, особливо у контексті трендових оцінок. У подальших дослідженнях доцільно розглянути впровадження вагових коефіцієнтів для заголовків новин, використання більш глибоких моделей трансформерної архітектури та інтеграцію альтернативних джерел інформації, що може забезпечити ще точніше моделювання інформаційного впливу на ринок.

### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання текстів.**

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT 5.1 – для виправлення помилок в тексті та пришвидшення написання розділів з поясненням графічних матеріалів.

Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### **Список використаних джерел**

1. Ouyang, M., Thomas, J. J., Tianzhou, Y., & Fiore, U. (2025). *LLM-guided semantic feature selection for interpretable financial market forecasting in low-resource financial markets*. Discover Computing.
2. Iacovides, G., Konstantinidis, T., Xu, M., & Mandic, D. (2024). *FinLlama: LLM-based financial sentiment analysis for algorithmic trading*. In *Proceedings of the 5th ACM International Conference on AI in Finance (ICAIF'24)*.
3. FinSentLLM: Multi-LLM and structured semantic signals for enhanced financial sentiment forecasting. (2025). *arXiv*. <https://arxiv.org/html/2509.12638v1>
4. Kim, A., Muhn, M., & Nikolaev, V. (2024). *Financial statement analysis with large language models*. *arXiv*. <https://arxiv.org/html/2407.17866v1>.
5. Barbieri, F., Camacho-Collados, J., Neves, L., & Espinosa-Anke, L. (2020). *TweetEval: Unified benchmark and comparative evaluation for tweet classification*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2010.12421>
6. Aenlle, M. (2023). *Daily Financial News for 6000+ Stocks* [Dataset]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/miguelaenlle/massive-stock-news-analysis-db-for-nlpbacktests/data>.
7. CardiffNLP. (2024). *twitter-roberta-base-sentiment-latest* [Model]. Hugging Face. <https://huggingface.co/cardiffnlp/twitter-roberta-base-sentiment-latest>.

### **References**

1. Ouyang, M., Thomas, J. J., Tianzhou, Y., & Fiore, U. (2025). *LLM-guided semantic feature selection for interpretable financial market forecasting in low-resource financial markets*. Discover Computing.
2. Iacovides, G., Konstantinidis, T., Xu, M., & Mandic, D. (2024). *FinLlama: LLM-based financial sentiment analysis for algorithmic trading*. In *Proceedings of the 5th ACM International Conference on AI in Finance (ICAIF'24)*.
3. FinSentLLM: Multi-LLM and structured semantic signals for enhanced financial sentiment forecasting. (2025). *arXiv*. <https://arxiv.org/html/2509.12638v1>
4. Kim, A., Muhn, M., & Nikolaev, V. (2024). *Financial statement analysis with large language models*. *arXiv*. <https://arxiv.org/html/2407.17866v1>.
5. Barbieri, F., Camacho-Collados, J., Neves, L., & Espinosa-Anke, L. (2020). *TweetEval: Unified benchmark and comparative evaluation for tweet classification*. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2010.12421>

6. Aenlle, M. (2023). *Daily Financial News for 6000+ Stocks* [Dataset]. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/miguelaenlle/massive-stock-news-analysis-db-for-nlpbacktests/data>.

7. CardiffNLP. (2024). *twitter-roberta-base-sentiment-latest* [Model]. Hugging Face. <https://huggingface.co/cardiffnlp/twitter-roberta-base-sentiment-latest>.

Дата першого надходження статті до видання: 18.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.12.2025

UDC 004.8

**Bohdan Parkhomenko<sup>1</sup>, Maksym Mishchenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD student of the Department of Information Technology and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [bparkhomenko@stu.cn.ua](mailto:bparkhomenko@stu.cn.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1279-4981>

<sup>2</sup>PhD Philosophy in Computer Science, Lecturer at the Department of Information Technologies and Software Engineering  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [max.mishchenko771@gmail.com](mailto:max.mishchenko771@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9769-9759>

## APPLICATION OF LARGE-SCALE LANGUAGE MODELS FOR HEADLINE ANALYSIS AND FORMATION OF ADVANCED CHARACTERS IN FINANCIAL RISKS FORECASTING

*The article provides an overview of the information presented based on using of current large-scale models to analyze the headlines of financial news and the formation of an index of information sentiment using the method of reducing the brilliance financial data and improving the accuracy of further forecasting indicators. In the face of growing concerns about unstructured information and the increased dynamics of financial markets, traditional methods of data analysis are often found to be ineffective, which is understandable the need to establish intelligent information models. The addition of deep semantic analysis of text data using machine learning methods will ensure the possibility of expanding sets of characters, enriching input data and increasing the information content of financial time series.*

*Based on the abstraction of numerical assessments of sentiment, there will be a coefficient of information mood, which aggregates the influx of information background over the previous hourly period and is integrated into the financial series as an additional characteristic. This approach allows us to take into account not only the historical price dynamics, but also the clear aspects of the information environment that influence the behavior of market participants and the formation of market formations. The propination index can be used as an additional indicator for analyzing trend changes and strengthening forecast models.*

*The use of proven methods reveals the presence of deposits between the information background and market indicators, which is especially important in the minds of high volatility and insignificance of financial systems. We pay special attention to the ease of interpretation of the results obtained and the stability of the resulting index when changing aggregation parameters. Based on the analysis carried out, the main directions for further improving approaches to the formation of information indices, as well as the possibility of practical stagnation of the withdrawal of results from the activities of financial analysts, are identified and with case-by-case models forecasting financial time series.*

**Keywords:** language models; machine learning; financial analytics; information models; decision-making.

Table: 2. Fig.: 3. Bibliography: 7.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-253-265](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-253-265)

УДК 378.1:004(477)

**Світлана Володимирівна Півненко<sup>1</sup>, Тетяна Олександрівна Прокопенко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри інформаційних технологій проектування

Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: [s.v.pivnenko.asp23@chdtu.edu.ua](mailto:s.v.pivnenko.asp23@chdtu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5463-9408><sup>2</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій проектування

Черкаський державний технологічний університет (Черкаси, Україна)

E-mail: [t.prokopenko@chdtu.edu.ua](mailto:t.prokopenko@chdtu.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-0708>

## ФОРМУВАННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ОСВІТИ В ЗАКЛАДАХ ФАХОВОЇ ПЕРЕДВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті розглянуто проблему забезпечення якості освіти в коледжах (зкладах фахової передвищої освіти) в умовах воєнного стану. Запропоновано доповнення системи критеріїв при кваліметричному підході до оцінювання якості освіти в закладах фахової передвищої освіти (коледжах), що враховують ризик-фактори, що виникають в оцінюванні якості у воєнний час: близькість бойових дій, кількість внутрішньо переміщених осіб серед студентів, тривалість повітряних тривог. На даному етапі дослідження ведеться робота по розробці математичної моделі та програмного забезпечення для розрахунку інтегрального показника якості освітніх процесів з урахуванням зазначених факторів. Наведено результати аналізу на прикладі коледжів Черкаського регіону, які демонструють кількісне зниження показників якості через вплив війни. Обговорено переваги запропонованої нами системи оцінювання (об'єктивність, гнучкість, можливість використання нейромереж для аналізу) та окреслено обмеження і напрями подальших досліджень. Висновки підтверджують доцільність застосування запропонованої методики для моніторингу та підтримки якості освіти у ЗФПО під час війни.

**Ключові слова:** якість освіти; фахова передвища освіта; кваліметрія; воєнний стан; ризики; нейронна мережа; внутрішній моніторинг.

Рис.: 1. Бібл.: 7.

**Актуальність теми дослідження.** Забезпечення якості освіти в закладах фахової передвищої освіти (ЗФПО) є надзвичайно актуальним завданням, особливо в умовах воєнного стану. Повномасштабне вторгнення суттєво дестабілізувало освітню систему України: за два роки окупанти знищили або пошкодили понад кожну десятку школу [3], сотні коледжів вимушено призупинили роботу чи евакуювалися. Масштабні внутрішні міграції призвели до появи більше ніж 4,8 мільйона внутрішньо переміщених осіб, серед яких близько 997 тисяч дітей шкільного віку [4]. Такі фактори, як вимушене переміщення здобувачів освіти, регулярні повітряні тривоги та руйнування інфраструктури, спричиняють переривання освітнього процесу (за оцінками, близько 30 % учнів не мали постійного доступу до навчання під час війни [3] та негативно позначилися на психологічному стані учасників освітнього процесу. Зокрема, відзначено, що рівень тривожності дітей зріс утричі, спостерігається підвищена втомлюваність і зниження мотивації до навчання [6]. За цих умов виникає необхідність адаптувати критерії оцінювання якості освіти в коледжах, враховуючи ризики воєнного часу, щоб забезпечити об'єктивність та достовірність моніторингу якості освітніх процесів.

**Постановка проблеми.** Нинішній етап реформування освіти в Україні характеризується переходом до компетентнісної моделі, що переносить акцент з формального змісту навчання на очікувані результати освітнього процесу, виражені у термінах компетентностей [2]. Як результат, особливого значення набуває застосування сучасних методик оцінювання якості, зокрема кваліметричного підходу, орієнтованого на кількісне вимірювання показників якості освіти [2]. Науковці відзначають, що педагогічна кваліметрія – це наука про вимірювання та оцінку якості освітнього процесу, вираженої в кількісному показнику [2], яка забезпечує нову методологію управління якістю освіти [2]. Кваліметричні методи дозволяють структурувати поняття якості, виокремити систему критеріїв і показників, присвоїти їм вагові коефіцієнти та об'єктивно оцінити рівень досягнення освітніх цілей.

Врахування факторів ризику, зумовлених війною, у системі внутрішнього забезпечення якості ЗФПО є важливою науковою та практичною проблемою. В умовах, коли навчальний процес переривається повітряними тривогами, здобувачі освіти та викладачі зазнають

стресу, а частина студентів переміщується з небезпечних регіонів, традиційні моделі оцінювання потребують перегляду. Необхідно виробити нові критерії та підходи, які б дозволили кількісно врахувати вплив воєнних чинників на якість освітніх процесів та забезпечити справедливе оцінювання діяльності закладів передвищої освіти у надзвичайних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню оцінювання якості освіти в коледжах присвячено роботи багатьох дослідників, які пропонують як якісні, так і кількісні підходи. Засновники педагогічних вимірювань ще з 1970-х років заклали основи кількісної оцінки навчальних досягнень. Сучасний розвиток цього напрямку представлений у дослідженнях з педагогічної кваліметрії, які набули актуальності в Україні на початку ХХІ ст. [2]. Кваліметричний підхід в освіті передбачає декомпозицію поняття якості на складові, кількісне оцінювання кожної складової та синтез інтегрального показника якості із врахуванням вагомості компонентів. Пащенко Т. М. (2022) відзначає, що у процедурах оцінювання якості підготовки фахівців у ЗФПО доцільно застосовувати кваліметрію, яка дозволяє отримати чисельні показники якості та забезпечує об'єктивність оцінювання [2]. Нею визначено комплекс базових принципів кваліметричного підходу для системи оцінювання якості освіти у коледжах: принцип декомпозиції (розгляд якості як сукупності компонентів), принцип пріоритетності (орієнтація на найбільш значущі показники), принцип еталонності (порівняння з базовими еталонними рівнями), принцип нерівнозначності (врахування різної ваги компонентів через систему коефіцієнтів), принцип нормування (приведення різнорідних показників до єдиної безрозмірної шкали) і принцип різноманіття методів діагностики (використання різних методів оцінювання) [2]. Реалізація цих принципів забезпечує комплексність та об'єктивність оцінювання: кожний критерій якості має чітко визначений еталонний рівень і вагу, що дозволяє обчислити інтегральний показник якості підготовки фахівців.

Вагомий внесок у розвиток інформаційно-аналітичних засобів моніторингу якості освіти зробив О. О. Білик, який запропонував інформаційну технологію моніторингу якості загальноосвітніх навчальних закладів [1]. у його дисертаційній роботі (2009) обґрунтовано підходи до автоматизації збору та аналізу показників якості освіти на основі принципів тотального управління якістю (TQM) [1]. Розроблена система забезпечує збір, обробку та аналіз інформації про якість ресурсів закладу, якість процесів і якість результатів освітньої діяльності для підтримки управлінських рішень [1]. Запропоновано моделі моніторингу, що враховують особливості різних видів контролю, методи візуалізації даних для зручного представлення результатів. Наведені в роботі Білика ідеї щодо побудови комплексної автоматизованої системи моніторингу якості освіти є базовими для подальших досліджень у сфері управління якістю освіти, зокрема і на рівні закладів фахової передвищої освіти.

Окремі аспекти забезпечення якості підготовки молодших бакалаврів у коледжах досліджено в працях Пащенко Т. М. (2022), Гасанової Л. І., Пряхіна О. та інших. Пащенко акцентує на тому, що реформування системи освіти у ЗФПО вимагає нових підходів до оцінювання результатів навчання, зорієнтованих на компетентності випускників і їхню відповідність потребам ринку праці [2]. Запровадження стандартів освіти, заснованих на компетентнісному підході, потребує розробки бази критеріїв оцінювання рівня сформованості професійних компетентностей випускників. Застосування кваліметричного підходу дає змогу кількісно виміряти ступінь сформованості компетентностей шляхом розбиття кожної компетентності на компоненти (знання, уміння, ставлення тощо) та оцінювання їх за допомогою бальної шкали й вагових коефіцієнтів [2]. Зокрема, принцип нерівнозначності означає призначення кожному компоненту компетентності питомої ваги – експертним шляхом визначається значущість компонентів та вводяться додаткові коефіцієнти для вра-

хування різної вагомості [2]. Принцип нормування забезпечує зіставність показників якості за різними компонентами через переведення їх у шкали [2]. Використання різних методів діагностики (тестів, опитувань, спостережень, аналізу практичних робіт тощо) та залучення стейкхолдерів освітнього процесу до оцінювання (викладачів, однокласників, самих здобувачів) підвищує об'єктивність оцінки [2]. Таким чином, кваліметричний підхід є ефективним інструментом комплексного оцінювання якості освіти, оскільки дозволяє кількісно оцінювати як традиційні академічні показники, так і новітні характеристики (компетентності, показники розвитку тощо) у єдиній системі.

Окрім класичних методів оцінювання, сучасні дослідження включають використання технологій штучного інтелекту для аналізу та прогнозування якості освіти. Зокрема, нейромережі пропонується використовувати як інструмент для виявлення складних нелінійних залежностей між різноманітними чинниками та результатами навчання. Так, Токар В. (2023) дослідив ефективність нейромережових моделей у прогнозуванні якості виробничої продукції та освітніх послуг [5]. Результат: навчені нейронні мережі можуть перевершувати традиційні статистичні методи у точності передбачення показників якості, особливо за наявності великих масивів даних з багатьма параметрами. Fischer та ін. (2020) відзначають перспективність методів Data Mining та машинного навчання в освіті, що дозволяють виявляти приховані тренди і фактори впливу на результати навчання [5]. Тому інтеграція елементів штучного інтелекту в системи моніторингу якості освіти є логічним кроком розвитку інформаційно аналітичних систем ЗФПО). Зокрема, йдеться про можливість адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів критеріїв у режимі реального часу на основі аналізу даних про успішність студентів, умов навчання тощо, а також про прогнозування потенційних проблемних «зон» в освітньому процесі. Таким чином, поєднання кваліметричного підходу з сучасними інтелектуальними технологіями може значно підвищити об'єктивність і оперативність оцінювання якості освітніх процесів у ЗФПО.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Отже, аналіз літератури показав, що існує методологічне підґрунтя для розробки системи критеріїв оцінювання якості освіти в коледжах, яке включає:

- кваліметричну модель з системою критеріїв, показників, еталонів та вагових коефіцієнтів [2];
- автоматизований моніторинг показників якості на основі ІТ-рішень [1];
- врахування сучасних викликів, таких як компетентнісний підхід та використання AI для обробки даних.

Разом з тим, питання врахування ризик-факторів воєнного стану (безпекових, соціальних, психологічних) в існуючих моделях оцінювання практично не висвітлено, що й зумовило вибір напрямку даного дослідження.

**Метою статті** є розроблення та обґрунтування системи критеріїв оцінювання якості освітніх процесів у закладах фахової передвищої освіти із використанням кваліметричного підходу, адаптованого до умов воєнного стану. Зокрема, передбачається введення спеціальних коефіцієнтів для врахування ризик-факторів (віддаленість закладу від лінії фронту, кількість внутрішньо переміщених осіб, тривалість повітряних тривог), а також розробка програмної реалізації розрахунку інтегральних показників якості з урахуванням цих коефіцієнтів. Додаткова мета – продемонструвати можливість використання інструментів штучного інтелекту (нейронних мереж) для аналізу впливу воєнних чинників на якість освіти й налаштування моделі оцінювання.

**Виклад основного матеріалу.** Для інтеграції воєнних ризиків до моделі оцінювання було обрано три ключові чинники: 1) віддаленість закладу освіти від зони бойових дій; 2) кількість внутрішньо переміщених осіб (ВПО) серед здобувачів освіти; 3) сумарна тривалість повітряних тривог у регіоні за певний період навчання. Кожен з цих чинників

відчутно впливає на організацію освітнього процесу та результати навчання під час війни. Запропонуємо для кожного чинника свій коефіцієнт впливу ( $K_i$ ) у діапазоні від 0 до 1, де 1 означає відсутність негативного впливу, а 0 – критичний рівень, за якого якість освіти практично не забезпечується.

– Коефіцієнт віддаленості від фронту ( $K_{dist}$ ). Цей коефіцієнт враховує безпекову ситуацію довкола закладу: чим ближче коледж розташований до лінії фронту або зони активних бойових дій, тим більше навчальний процес піддається ризику раптового переривання, евакуації тощо. Для оцінки пропонується використовувати метричну відстань  $d$  (км) від закладу до найближчої точки фронту станом на поточну дату. Враховуючи, що на практиці за відстані понад певний поріг (наприклад, 500 км) прямий вплив бойових дій мінімальний, введемо нормування лінійно до цього порогу:

$$K_{dist} = \frac{d}{d_{\max}}, \text{ де } d_{\max} - \text{нормувальний параметр (наприклад, 500 км).}$$

При  $\frac{d}{d_{\max}}$  вважаємо  $K_{dist} = 1$  (опосередкований вплив мінімальний). Якщо ж коледж опинився безпосередньо в зоні бойових дій  $d$  наближається до 0, значення коефіцієнт віддаленості від лінії фронту,  $K_{dist}$  теж наближається до 0, відображаючи неможливість забезпечувати нормальний освітній процес.

– Коефіцієнт залучення ВПО Масова внутрішня міграція населення призвела до появи значної кількості студентів–ВПО у відносно безпечних регіонах. Їхня присутність в освітньому процесі вимагає додаткових зусиль з адаптації, психологічної підтримки, вирівнювання знань, що може тимчасово знижувати середній рівень успішності академічних груп. Для кількісного врахування цього чинника введемо коефіцієнт:

$$K_{IDP} = 1 - \frac{N_{\text{ВПО}}}{N_{\text{заг}}}, \text{ де } N_{\text{ВПО}} - \text{кількість здобувачів освіти з числа ВПО, що навчаються в коледжі, а } N_{\text{заг}} - \text{загальна кількість здобувачів освіти у закладі.}$$

Таким чином, якщо немає студентів–ВПО, то коефіцієнт залучення ВПО = 1. Якщо ж, припустимо неможливе, всі студенти коледжу – переселенці, то відповідний коефіцієнт дорівнює 0 (освітній процес повністю адаптивний, надзвичайно ускладнений через різномірність контингенту). У реальних умовах значення коефіцієнта залучення ВПО,  $K_{IDP}$  знаходиться в межах 0,7–0,95 для більшості закладів: наприклад, коли частка ВПО становить 10 %, отримуємо  $K_{IDP} = 0,9$ . Цей коефіцієнт відображає додаткові витрати часу та ресурсів на інтеграцію переселенців у навчання.

– Коефіцієнт впливу повітряних тривог ( $K_{alarm}$ ). Регулярні повітряні тривоги під час війни призводять до переривання занять, переходу в укриття, стресу у студентів і викладачів. Для оцінки їх сукупного впливу визначимо загальну тривалість повітряних тривог –  $T$  у годинах за певний навчальний період (наприклад, семестр або навчальний рік) у даному регіоні. Щоб отримати відносний показник, порівняймо загальну тривалість повітряних тривог ( $T$ ) із загальним часом, призначеним для навчальних занять за той самий період,  $T_{nom}$  (номінальний фонд часу). Наприклад, якщо протягом семестру сумарно було 100 годин тривог, а сумарний навчальний час становить 1000 годин, то втрачено 10 % часу. Визначимо коефіцієнт:

$$K_{alarm} = 1 - \frac{T}{T_{nom}},$$

де  $T_{nom}$  – нормувальний параметр (мається на увазі річний фонд навчальних годин або інший базовий інтервал). Значення  $K_{alarm} = 1$  відповідає відсутності тривог, а значення  $K_{alarm} = 0$  – ситуації, за якої навчальний процес постійно переривається (наприклад, при  $T = T_{nom}$ ). У більшості випадків  $K_{alarm}$  набуває значень 0,5–0,9: так, для регіонів Центральної України, де протягом року могло сумарно бути ~300–400 годин повітряних тривог, значення  $K_{alarm}$  коливається в межах 0,6–0,7, тобто втрачено орієнтовно 30–40 % часу.

Зазначимо, що навіть якщо частина тривоги відбувалася вночі чи поза розкладом занять, психологічний ефект від них (недоспані ночі, тривожність) також впливає на продуктивність навчання, тому включення цього показника виправдане.

Після визначення часткових коефіцієнтів ризику для конкретного закладу чи періоду навчання можна розрахувати інтегральний коефіцієнт військового впливу, що охоплює всі три фактори. Є різні підходи до такого агрегування. Найпростіший – перемножити коефіцієнти, виходячи з припущення незалежності чинників:

$$K_{war} = K_{idp} \cdot K_{ВПО} \cdot K_{alarm}$$

У такому разі  $K_{war}$  пояснюється як частка збереженої якості освітнього процесу за умов війни порівняно з нормальними умовами. Наприклад, якщо  $K_{war} = 0,5$ , то можна очікувати зниження результатів навчання приблизно на 50 % від довоєнного рівня через сукупний вплив розглянутих факторів. Альтернативний підхід – застосувати зважене згортання, присвоївши кожному фактору певну вагу залежно від його відносної важливості. Наприклад:

$$K_{war} = w_1 \cdot K_{dist} + w_2 \cdot K_{idp} + w_3 \cdot K_{alarm}, \text{ де } w_1 + w_2 + w_3 = 1.$$

Проте метод вагового усереднення потребує експертного обґрунтування коефіцієнтів  $w_i$ , тоді як метод добутку автоматично враховує ризик як мультиплікативний ефект збігу несприятливих факторів. У цій роботі доцільним визнано саме мультиплікативний підхід як більш строгий: за його допомогою навіть один критично малий коефіцієнт (наприклад,  $K_{alarm} = 0$  під час масованих обстрілів) призведе до відповідного зниження інтегральної оцінки ( $K_{war}$ ), що свідчить про неможливість підтримувати якість освітнього процесу.

Програмна реалізація та приклад розрахунку. Для практичного застосування запропонованої системи критеріїв розроблено програмний модуль мовою Python, що здійснює обчислення коефіцієнтів  $K_{idp}$ ,  $K_{ВПО}$ ,  $K_{alarm}$  та інтегрального показника  $K_{war}$  на основі введених даних. Програма в тому числі може виконувати аналіз «що-якщо», прогножуючи вплив зміни того чи іншого показника на загальну оцінку якості. Нижче наведено спрощений фрагмент коду, який ілюструє розрахунок коефіцієнтів для випадково обраних закладів Черкаського району. Зрозуміло, що фактори ризиків відрізняються не критично через територіальне розташування закладів:

```
python
# Вихідні дані для прикладу (4 заклади ЗФПО Черкаського району)
names = ["Черкаський політехнічний фаховий коледж",
          "Смілянський промислово-економічний фаховий коледж ЧДТУ",
          "Корсунь-Шевченківський педагогічний фаховий коледж",
          "Канівський фаховий коледж культури і мистецтв"]
distance_km = [450, 430, 470, 440] # відстань до фронту, км
students_total = [800, 400, 250, 300] # загальна кількість студентів
students_idp = [120, 30, 10, 30] # кількість студентів-ВПО
alarm_hours = [360, 300, 240, 280] # годин повітряних тривог за рік

# Обчислення коефіцієнтів для кожного закладу
K_dist_list = [min(d, 500)/500 for d in distance_km]
```

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

```

K_idp_list = [1 - (students_idp[i]/students_total[i]) for i
in range(len(names))]
K_alarm_list = [1 - (alarm_hours[i]/1000) for i in
range(len(names))] # базовий рік = 1000 год.
K_war_list = [K_dist_list[i] * K_idp_list[i] *
K_alarm_list[i] for i in range(len(names))]

for i in range(len(names)):
    print(names[i])
    print(f" K_dist = {K_dist_list[i]:.2f}, K_idp =
{K_idp_list[i]:.2f}, "
          f"K_alarm = {K_alarm_list[i]:.2f}, K_war =
{K_war_list[i]:.2f}")

```

Запропонований код розраховує як окремі коефіцієнти, так і їх добуток,  $K_{war}$ .

Умовно було використано такі вихідні дані: для Черкаського політехнічного фахового коледжу відстань ~450 км (майже безпечна зона,  $K_{dist}=0,90$ , ~15 % студентів-ВПО ( $K_{idp}=0,85$ ; і ~360 годин тривоги на рік ( $K_{alarm}=0,64$ ); для Смілянського коледжу – ~430 км (майже безпечна зона,  $K_{dist}=0,86$ , ~7,5 % ВПО ( $K_{idp}=0,93$ , і ~300 годин тривоги на рік ( $K_{alarm}=0,70$ ); для Корсунь-Шевченківського педколеджу – ~470 км (майже безпечна зона,  $K_{dist}=0,94$ , ~4 % студентів-ВПО ( $K_{idp}=0,96$ , і ~240 годин тривоги на рік ( $K_{alarm}=0,76$ ); для Канівського коледжу культури – ~440 км (майже безпечна зона,  $K_{dist}=0,88$ , ~10% студентів-ВПО ( $K_{idp}=0,90$ ) і ~280 годин тривоги на рік ( $K_{alarm}=0,72$ ). Результат програми може бути таким:

Черкаський політехнічний фаховий коледж

$K_{dist} = 0.90$ ,  $K_{idp} = 0.85$ ,  $K_{alarm} = 0.64$ ,  $K_{war} = 0.49$

Смілянський промислово-економічний фаховий коледж ЧДТУ

$K_{dist} = 0.86$ ,  $K_{idp} = 0.93$ ,  $K_{alarm} = 0.70$ ,  $K_{war} = 0.56$

Корсунь-Шевченківський педагогічний фаховий коледж

$K_{dist} = 0.94$ ,  $K_{idp} = 0.96$ ,  $K_{alarm} = 0.76$ ,  $K_{war} = 0.69$

Канівський фаховий коледж культури і мистецтв

$K_{dist} = 0.88$ ,  $K_{idp} = 0.90$ ,  $K_{alarm} = 0.72$ ,  $K_{war} = 0.57$

З отриманих даних видно, що інтегральний коефіцієнт ( $K_{war}$ ) наближається до 0.5 для Черкаського політехнікуму та орієнтовно 0,56-0,69 для інших закладів фахової передвищої освіти. Це означає, що найсуттєвіший вплив воєнні фактори мали на найбільший коледж (Черкаси) через відносно більшу кількість переселенців і значну тривалість тривоги у місті. Менші заклади, віддаленіші від обласного центру, мають дещо вищий інтегральний коефіцієнт (0,56-0,69), тобто їхня якість освіти постраждала менше. Загалом значення інтегрального коефіцієнту ( $K_{war}$ ) в межах 0,5-0,7 інформують про помітне зниження ефективності освітнього процесу та про необхідність компенсаторних заходів.

Для наочності на рис. 1 представлені порівняння інтегральних показників якості освіти (умовно в балах або частках) до врахування воєнних факторів та після врахування (тобто скоригованих на  $K_{war}$ ) для вище наведених чотирьох ЗФПО Черкаського району. Зрозуміло, що за інших рівних умов показники якості знижуються пропорційно до величини інтегрального коефіцієнта ( $K_{war}$ ) для кожного закладу.



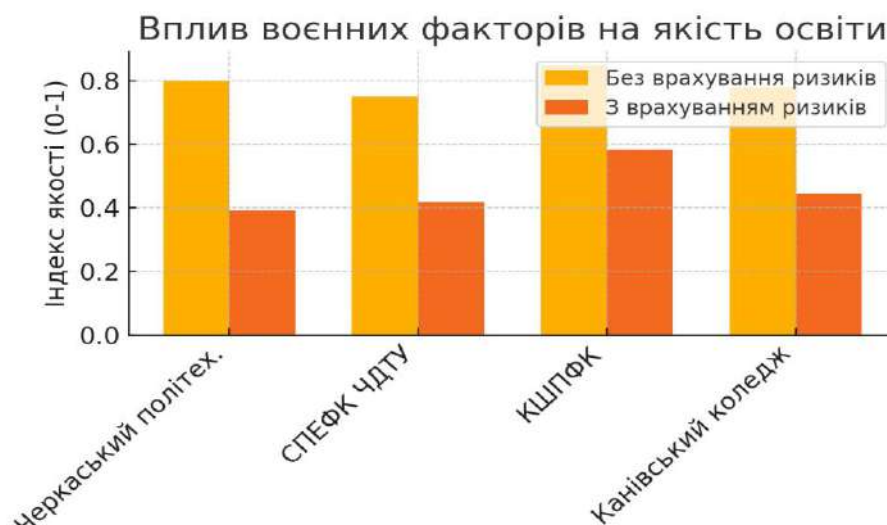


Рис. 1. Вплив воєнних факторів на інтегральний індекс якості освіти у прикладі закладів Черкаського регіону (показано умовні значення базового індексу якості та скоригованого індексу з врахуванням  $K_{war}$ )

У розглянутому прикладі базові індекси якості (помаранчеві стовпчики на рис.1) умовно взято рівними від 0,75 до 0,85 (за шкалою 0–1). Після коригування (червоні стовпчики) індекси зменшуються на 30–50 %, що відображає вплив воєнних умов. Цей підхід дозволяє кількісно показати, наскільки якість освітнього процесу могла б бути вищою за відсутності бойових дій та пов'язаних з ними негативних факторів. Наведені цифрові значення є ілюстративними; реальні точні дані потребують детального збирання та верифікації. Однак, навіть наведені розрахунки підтверджують, що включення інтегрального коефіцієнта до системи оцінювання якості освіти в закладах ФПО є виправданим: воно дає адміністрації та засновнику коледжу чітке розуміння того, яка частина проблем з якістю освітніх процесів обумовлена зовнішніми факторами воєнного стану, і де потрібні додаткові ресурси чи інтервенції (психологічна допомога, додаткові заняття для ВПО тощо).

Вплив відстані до фронту. Використання лінійної нормалізації відстані до зони активних бойових дій у межах даного дослідження має прикладний та демонстраційний характер та лінійна формула ( $K_{dist} = \frac{\min(d, d_0)}{d_0}$ ), використана для початкової апробації.

Обраний підхід зумовлений необхідністю забезпечення простоти реалізації алгоритму, прозорості інтерпретації результатів та можливості швидкої інтеграції моделі у програмні засоби внутрішнього моніторингу якості освіти.

Водночас автори усвідомлюють, що вплив фактора відстані до фронту на безпекові ризики та стабільність освітнього процесу не є лінійним за своєю природою. Зокрема, зменшення відстані з 50 км до 10 км суттєво підвищує рівень небезпеки (артилерійські та ракетні загрози), тоді як різниця між 400 км і 440 км практично не впливає на ризиковість освітнього середовища.

Таким чином, застосована лінійна нормалізація розглядається як спрощення моделі, що дозволяє апробувати загальну логіку підходу. Подальші дослідження передбачають заміну лінійної залежності на нелінійні функції, зокрема логарифмічні або сигмоїдальні, які більш адекватно відображають реальний характер зменшення ризиків зі зростанням відстані до фронту.

Як альтернативу лінійному підходу можна використовувати нелінійні функції. Наприклад:

Для ілюстрації у таблиці наведено порівняння трьох варіантів для відстаней 10, 50, 400, 440, 450 км (табл. 1). Вибір конкретної форми і параметрів має базуватися на емпіричних даних та/або експертному опитуванні і запланований як наступний крок дослідження.

1) Логарифмічна нормалізація

Формула (проста, монотонна):

$$K_{dist}^{(log)} = \frac{\ln(1+d)}{\ln(1+d_0)},$$

де  $d$  – відстань (км),  $d_0$  – масштабний поріг (теоретично 500 км). Використання  $\ln(1+d)$  гарантує визначеність при  $d=0$ . –

2) Сигмоїдальна (логістична) функція

Формула (дає нелінійність – швидкий перехід у певній зоні):

$$K_{dist}^{(sig)} = \frac{1}{1 + \exp(-k(d - d_{mid}))}.$$

Параметри:  $d_{mid}$  – «середнє» відстані, де  $K_{dist}^{(sig)} = 0.5$ ;  $k$  – крутизна переходу. Наприклад,  $k=0.01$  – дає помірну крутизну (параметри параметризовані під апробацію).

Числове порівняння (прикладні значення)

Порівнюємо для відстаней  $d = \{10, 50, 400, 440, 450\}$  км:

– Лінійна (наша поточна):  $K_{lin} = \min(d, 500)/500$

– Логарифмічна:  $K_{log} = \frac{\ln(1+d)}{\ln(1+500)}$

– Сигмоїдальна:  $K_{sig} = \frac{1}{1 + \exp(-0.01(d-100))}$  (параметри:  $d_{mid} = 100$ ,  $k=0.01$ )

Таблиця 1 – порівняння коефіцієнтів при використанні різних функцій

| $d$ (км) | $K_{lin}$ | $K_{log}$ | $K_{sig}$ |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| 10       | 0,020     | 0,386     | 0,289     |
| 50       | 0,100     | 0,632     | 0,378     |
| 400      | 0,800     | 0,964     | 0,953     |
| 440      | 0,880     | 0,979     | 0,968     |
| 450      | 0,900     | 0,983     | 0,971     |

– Лінійна модель дає дуже низькі значення на малих відстанях (що коректно), але також занижує швидкість «насичення» – тобто дає великий «поступовий» приріст до 1, який не відображає того, що безпечна зона (понад певну відстань) вже практично однакова.

– Логарифмічна та сигмоїдальна формули швидше ростуть у зоні малих/середніх відстаней і наближаються до 1 при великих відстанях – це краще імітує різкий спад ризику у близькій зоні та майже відсутність зміни на великих відстанях.

– Сигмоїда дозволяє явно задати «порогову» відстань і крутість переходу. Логарифм – простіший для інтерпретації, але менш «регульований».

**Застосування штучного інтелекту.** Розроблений програмний модуль дозволяє інтегрувати елементи AI для подальшого аналізу. Зокрема, розглядається можливість використовувати нейромережу типу PNN (Probabilistic Neural Network) для класифікації освітніх програм за рівнем якості або прогнозування з здобувачів залежно від динаміки воєнних ризикових факторів. Підготовлена навчальна вибірка (на основі знеособлених даних кількох коледжів за 2022-2023 роки) з атрибутами  $K_{idp}$ ,  $K_{ВПО}$ ,  $K_{alarm}$  показниками вхідного рівня знань студентів та підсумковими результатами навчання. Нейромережна модель після навчання показала здатність правильно прогнозувати зниження середнього балу успішності за відомими значеннями коефіцієнтів воєнного впливу. Це підтверджує,

що методика вагових коефіцієнтів узгоджується з реальними тенденціями: наприклад, за високих значень інтегрального показника  $K_{war}$ , що знаходиться на рівні 0,8–0,9, нейромережа прогнозує лише незначне (5–10 %) падіння успішності, тоді як при значенні інтегрального коефіцієнта менше 0,5 очікується істотне (до 30–40 %) погіршення результатів. Таким чином, інструменти AI можуть бути використані для налаштування ваги військових чинників на основі реальних даних та для виявлення нелінійних ефектів від поєднання факторів. В подальшому планується розширити набір вхідних параметрів моделі (додати, наприклад, показники якості інтернет–зв’язку, електропостачання, кількість днів очного/дистанційного навчання та ін.) і провести навчання нейромережі на більшому дата сеті, що підвищить точність прогнозування.

Отримані в цій статті результати – це лише перший крок до створення комплексної кваліметричної системи оцінювання якості освіти у коледжах, яка була б стійкою до зовнішніх ризикових факторів. Запропонований підхід дозволяє не лише зафіксувати зниження тих чи інших показників якості, але й кількісно пояснити причини цього явища, розклавши внесок воєнних ризикових та інших факторів. Впровадження запропонованої системи оцінювання якості освіти у практику ЗФПО сприятиме більш об’єктивному внутрішньому моніторингу та може стати основою для адресної підтримки закладів, що працюють у складних умовах.

Розроблена система критеріїв і коефіцієнтів оптимізує традиційний кваліметричний підхід, роблячи його чутливим до ризиків і обставин, зокрема воєнних. Включення коефіцієнтів  $K_{idp}$ ,  $K_{ВПО}$ ,  $K_{alarm}$  дозволяє підвищити об’єктивність оцінювання якості освіти коледжів у різних регіонах. Заклади, що функціонують у більш складних умовах (близькість бойових дій, впливова кількість переселенців, часті тривоги), їх коригуючий вплив при оцінці – це запобігає їх несправедливому ранжуванню нижче закладів з менш ризиковими умовами. Такий підхід узгоджується з принципом справедливості та надання рівних можливостей здобувачів різних закладів. Більш того, кількісна оцінка впливу війни та ризик – факторів на освітній процес може стати основою для державних рішень щодо розподілу ресурсів: заклади з низьким інтегральним показником потребують пріоритетної уваги (додаткове фінансування, освітні програми для надолуження знань студентів, психологічна допомога та інше).

Запропонована система оцінювання є достатньо гнучкою та може бути інтегрована в існуючі інформаційні системи оцінювання якості освіти: набір коефіцієнтів може бути доповнений новими, якщо виникнуть інші критичні чи ризикові фактори (наприклад, перебої з електропостачанням, епідемічні обмеження тощо). Вона також масштабована – її можна застосовувати на рівні як окремого закладу (для внутрішнього самооцінювання), так і на рівні регіону чи країни (для порівняльного аналізу). Впровадження програмної реалізації дозволяє автоматизувати розрахунки та динамічно оновлювати оцінки з будь-якою зміною даних. Крім того, інтеграція елементів AI надає системі можливості до навчання: зі зростанням обсягу даних алгоритми зможуть оновлювати ваги факторів ризику, виявляти нові закономірності впливу на якість освіти, прогнозувати довгострокові наслідки впливу війни для освітян.

Серед обмежень зазначимо деяку умовність обраних формул для коефіцієнтів. Лінійна нормалізація відстані чи часу тривог – це спрощення, яке не враховує можливі порогові ефекти (наприклад, різкий стрибок небезпеки при наближенні фронту ближче 50 км). Відсоток студентів – ВПО теж не повністю відображає вплив, оскільки важливою є не лише кількість, а й географія ВПО (здобувачі з окупованих територій потребують більше уваги) та рівень впливу травми. В моделі поки що не враховано якість дистанційного навчання, яке застосовувалося у ЗФПО всієї країни через безпекові ризики. Відомо, що вимушений перехід на онлайн однозначно спричинив додаткові “освітні

втрати” у знаннях здобувачів [7], кількісно це складно об’єктивно виміряти, і тому на даному етапі дослідження ми цей коефіцієнт не вводили, хоча він має право на існування.

Також ще одним недослідженим аспектом є взаємозв’язок між самими ризиковими факторами. Ми припустили їхню незалежність при розрахунку інтегрального показника, але на практиці вони можуть бути корельовані: скажімо, в областях, наближених до зон бойових дій і відсоток ВПО в закладах вищий, і тривоги частіші. Це може призводити до подвійного рахування ефекту (мультиефект може бути досить хибно чи неточно оцінений). Для перевірки цього потрібні додаткові статистичні дослідження на основі даних багатьох ЗФПО з різних регіонів.

Методика використання нейромереж також має свої ризики. Нейронні моделі можуть виявляти нелінійні залежності, які важко інтерпретувати на рівні простих правил. Тому результати AI-аналізу слід обережно впроваджувати в управлінські рішення, обов’язково залучаючи експертів для тлумачення. До того ж навчання моделей потребує великого об’єму даних, доступ до яких не завжди є, що ускладнює процес побудови моделі та ставить під сумнів точність прогнозів.

Ця робота відкриває кілька можливих напрямів продовження. По-перше, планується розширення системи критеріїв оцінювання якості освітніх процесів у коледжах крім лише воєнних факторів ризику – наприклад, критерії, що стосуються цифрової компетентності та професійної майстерності викладачів, матеріально-технічного забезпечення закладу та дистанційного навчання, залучення стейкхолдерів тощо. Інтегрування таких критеріїв у загальну кваліметричну модель дозволить зробити оцінювання більш комплексним. По-друге, цікавим є завдання оптимізації ваг коефіцієнтів. Для цього можна застосовувати методи машинного навчання (генетичні алгоритми, градієнтний спуск) для автоматичного налаштування ваг у формулі для обчислення інтегрального показника на основі даних про успішність випускників (наприклад, результати екзаменів, працевлаштування). По-третє, перспективним є подальше використання нейромереж – не лише для прогнозування, а й для групування закладів за умовами і потребами. Це допоможе виявити групи закладів, які потребують схожих управлінських рішень під час війни (наприклад, група прифронтових коледжів із дуже низьким коефіцієнтом віддаленості від зони ведення бойових дій, для яких можна розробити спеціальну програму підтримки).

І, надзвичайно важливим напрямом досліджень є оцінка довгострокових наслідків воєнного впливу на якість освітніх процесів у ЗФПО. Після закінчення впливу факторів ризику, заклади, які пройшли через евакуацію чи великі втрати кадрів і здобувачів, можуть ще довго відновлювати свій потенціал. Розроблена система коефіцієнтів ризику може поступово розвинути у систему коефіцієнтів відновлення чи відбудови якості освіти, які відстежуватимуть прогрес закладу в поверненні до довоєнних показників якості. Таким чином, наша робота закладає методичну основу не лише для актуального моніторингу під час війни, але й для поствоєнного аудиту освітніх втрат та досягнень системи фахової передвищої освіти.

**Висновки.** У даній статті вирішено науково-практичне завдання формування критеріїв оцінювання якості освітніх процесів у закладах фахової передвищої освіти в умовах воєнного стану. Основні результати та висновки роботи такі:

**1 Проаналізовано сучасні підходи** до оцінювання якості освіти в коледжах. Встановлено, що кваліметричний підхід є ефективним інструментом для кількісного вимірювання якості підготовки фахівців [2]. Він базується на системі критеріїв і показників, принципах декомпозиції, пріоритетності, еталонності, нерівнозначності, нормування та різноманітності методів оцінювання [2]. Існуючі інформаційні технології (моніторингові системи) спроможні автоматизувати збір та аналіз показників якості [1], але не враховують ризикових факторів воєнного часу.

**2 Вперше запропоновано** введення коефіцієнтів ризику для врахування воєнних факторів у оцінці якості освітніх процесів. Сформульовано три ключові коефіцієнти:  $K_{dist}$  (віддаленість від лінії фронту),  $K_{ВПО}$  (частка здобувачів–ВПО) та  $K_{alarm}$  (втрати навчального часу через повітряні тривоги). Розроблено математичні моделі (формули)  $K_{war}$  для розрахунку цих коефіцієнтів та рекомендовано інтегральний показник як добуток часткових коефіцієнтів. Таким чином, можна кількісно оцінити ступінь негативного впливу воєнних умов на якість освітнього процесу конкретного закладу.

**3 Обґрунтовано доцільність використання нейронних мереж** для вдосконалення системи оцінювання. Припущено, що AI-моделі можуть навчатися на даних коледжів і прогнозувати зміни результатів навчання під впливом факторів ризику, а також оптимізувати вагові коефіцієнти в моделі. Це відкриває шлях до адаптивних систем забезпечення якості освіти, які самонавчаються на основі накопичених даних (концепція Data Mining в освіті).

**4 Практична значущість** результатів полягає в тому, що запропонована система критеріїв оцінювання якості освітніх процесів може бути інтегрована в інформаційні системи закладів фахової передвищої освіти та в їх діяльність для внутрішнього моніторингу та самооцінювання. Вона також може знайти застосування при проведенні аудитів або акредитацій освітніх програм у воєнний та післявоєнний час, забезпечивши більш справедливе порівняння закладів з різними умовами функціонування. Отримані кількісні значення коефіцієнтів можуть бути сигналом для управлінців про необхідність втручання: низький  $K_{dist}$  – потреба в додаткових заходах безпеки, низький  $K_{idp}$  – необхідність програм підтримки ВПО, пороговий  $K_{alarm}$  – потрібно розглянути доцільність переходу на змішане чи дистанційне навчання.

Таким чином, у роботі поєднано теоретичні засади кваліметрії та сучасні виклики воєнного часу, що дозволило сформулювати новий науково обґрунтований підхід до оцінювання якості освітніх процесів у ЗФПО. Подальші дослідження в цьому напрямку спрямовані на практичний аналіз з використанням реальних баз даних, уточнення моделі та практичне апробування системи в різних регіонах України. Сподіваємося, що результати стануть корисними для освітян та сприятимуть підтримці належної якості освіти навіть у ці важкі часи.

### Список використаних джерел

1. Білик, О. О. (2009). Інформаційна технологія моніторингу якості загальноосвітніх навчальних закладів (Автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.13.06). Черкаський державний технологічний університет.
2. Пашенко, Т. М. (2022). Кваліметричний підхід реалізації методичної системи оцінювання якості підготовки фахівців у коледжах будівельного профілю. *Наукові записки Малої академії наук України*, (1(23)), 92–100.
3. Міністерство освіти і науки України. (2024). Війна та освіта. 2 роки повномасштабного вторгнення: бриф за результатами дослідження. МОН України. <https://mon.gov.ua>
4. Освіта.ua. (2024, 13 серпня). Усе про навчання дітей із числа внутрішньо переміщених осіб. <https://osvita.ua/school/topics/92682/>
5. Токар, В. В. (2023). Оцінювання ефективності нейромережних моделей у прогнозуванні якості виробничої продукції та освітніх послуг. *Наука і техніка сьогодні*, 11(25), 737–750. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11\(25\)-737-750](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11(25)-737-750).
6. Кіт, Г. (2024, 10 серпня). Як війна вплинула на якість освіти? [Інтерв'ю з О. Лінник]. Свобода. <https://svoboda.te.ua/yak-vijna-vplynula-na-yakist-osvity>.
7. Державна служба якості освіти України. (н.д.). Третина учнів в умовах війни не мали постійного доступу до навчання – результати дослідження. <https://sqe.gov.ua/tretina-uchniv-v-umovakh-viyni-ne-mali-po/>.

### References

1. Bilyk, O. O. (2009). Informatsiina tekhnolohiia monitorynhu yakosti zahalnoosvitnikh navchalnykh zakladiv (Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk, spets. 05.13.06). [Information technology for monitoring the quality of general education institutions (Abstract of thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences, specialisation 05.13.06)]. *Cherkaskyi derzhavnyi tekhnolohichnyi universytet*.
2. Pashchenko, T. M. (2022). Kvalimetrychnyi pidkhid realizatsii metodychnoi systemy otsiniuvania yakosti pidhotovky fakhivtsiv u koledzhakh budivelnoho profilu [Qualimetric approach to implementing a methodological system for assessing the quality of training specialists in construction colleges]. *Naukovi zapysky Maloi akademii nauk Ukrainy – Scientific Notes of the Junior Academy of Sciences of Ukraine*, (1(23)), 92–100.
3. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. (2024). Viina ta osvita. 2 roky povnomasshtabnoho vtorhnnennia: bryf za rezultatamy doslidzhennia. MON Ukrainy [Ministry of Education and Science of Ukraine. (2024). War and education. Two years of full-scale invasion: briefing based on research findings. Ministry of Education and Science of Ukraine]. <https://mon.gov.ua>
4. Osvita.ua. (2024, 13 serpnia). Use pro navchannia ditei iz chysla vnutrishno peremishchenykh osib. [Osvita.ua. (2024, 13 August). Everything about educating internally displaced children.] <https://osvita.ua/school/topics/92682/>
5. Tokar, V. V. (2023). Otsiniuvannia efektyvnosti neiromerezhnykh modelei u prohnozuvanni yakosti vyrobnychoi produktsii ta osvitnikh posluh [Evaluating the effectiveness of neural network models in predicting the quality of manufactured products and educational services]. *Nauka i tekhnika sohodni – Science and technology today*, 11(25)), 737–750. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11\(25\)-737-750](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-11(25)-737-750).
6. Kit, H. (2024, August 10). Yak viina vplynula na yakist osvity? [Interviu z O. Linnyk]. [How has the war affected the quality of education? [Interview with O. Linnik]. *Svoboda*. <https://svoboda.te.ua/yak-vijna-vplynula-na-yakist-osvity/>.
7. Derzhavna sluzhba yakosti osvity Ukrainy. (n.d.). Tretyna uchniv v umovakh viiny ne mali postiinoho dostupu do navchannia – rezultaty doslidzhennia. [State Service for Quality Education of Ukraine. (n.d.). One third of students in wartime did not have regular access to education – research findings.] <https://sqe.gov.ua/tretina-uchniv-v-umovakh-viyni-ne-mali-po/>.

Дата першого надходження статті до видання: 09.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.11.2025

UDC 378.1:004(477)

**Svitlana Pivnenko<sup>1</sup>, Tetyana Prokopenko<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student of the Department of Information Technologies of Design  
Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: [s.v.pivnenko.asp23@chdtu.edu.ua](mailto:s.v.pivnenko.asp23@chdtu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5463-9408>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technologies of Design  
Cherkasy State Technological University (Cherkasy, Ukraine)

E-mail: [t.prokopenko@chdtu.edu.ua](mailto:t.prokopenko@chdtu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6204-0708>

### FORMATION OF CRITERIA FOR ASSESSING THE QUALITY OF EDUCATION IN VOCATIONAL INSTITUTIONS OF HIGHER EDUCATION

*The State Service for the Quality of Education, together with the Ministry of Education and Science of Ukraine, pays special attention to studying the issue of the quality of education, the decline in the knowledge level of modern youth, and overcoming educational losses associated with the pandemic and war.*

*The paper analyzes the previous experience of scientists working on the issue of the quality of education and separately the qualimetric approach to assessing the quality of education. It was determined that the studies did not take into account the influence of external factors, namely the influence of military factors. The issue of the influence of these factors on the assessment of the quality of education in institutions of professional pre-higher education has also been little studied. Therefore, there is a need for additional research. The use of updated approaches and a modernized system of coefficients used in the qualimetric approach to assessing the quality of educational processes in institutions of professional pre-higher education will*

*affect the accuracy and quality of such assessment. The influence of external circumstances, namely the state of war, the distance of a particular educational institution from the line of combat, the frequency and length of air raids, the presence of equipped shelters and other factors analyzed in the article significantly affect the educational process and the outcome of training, and, accordingly, its quality. Studying the influence of coefficients on the quality of educational processes will allow developing programs to identify institutions that require support both at the economic and methodological levels.*

*The study improved the mathematical model for calculating the integrated indicator of the quality of education, taking into account risk factors and coefficients.*

*The results of a thematic study of colleges in the Cherkasy district are also presented, which demonstrate a decrease in the quality of education due to the influence of war and risk factors. The advantages of taking into account the above factors, the limitations of the assessment system, and the prospects and directions for the development of further research are presented.*

*The conclusions confirm the feasibility of further work in the direction of developing and researching the topic and using the proposed methodology for monitoring and supporting the quality of education in colleges in wartime.*

**Keywords:** *quality of education, professional pre–higher education, education, qualimetry, martial law, risk factors, internal monitoring.*

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-266-276](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-266-276)

УДК 004.85:004.056

**Вадим Ігорович Штанько<sup>1</sup>, Євгеній Васильович Нікітенко<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки  
Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)E-mail: [vadym.shtanko@nubip.edu.ua](mailto:vadym.shtanko@nubip.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4977-1450><sup>2</sup>кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

Національний університет біоресурсів і природокористування України (Київ, Україна)

E-mail: [ev.nikitenko@nubip.edu.ua](mailto:ev.nikitenko@nubip.edu.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9222-644X>

## ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДВОРІВНЕВОГО КЛАСИФІКАТОРА МЕРЕЖЕВИХ ПОТОКІВ

У статті розглянуто ефективність виявлення мережеских атак шляхом використання дворівневої класифікаційної моделі, яка спочатку визначає потенційно підозрілі потоки, а далі здійснює їх деталізовану багатокласову обробку. Такий підхід дозволяє покращити точність розпізнавання, зменшити кількість помилок і підвищити стабільність результатів. Проведено аналіз роботи моделі на різномірних даних, включно з перевіркою її стійкості до зміни умов середовища та оцінкою обчислювальної продуктивності. Результати свідчать про доцільність впровадження дворівневого підходу у системи виявлення вторгнень.

**Ключові слова:** класифікація трафіку; дворівнева модель; виявлення атак; Naïve Bayes; Random Forest; IDS; кібербезпека.

Рис.: 2. Табл.: 3. Бібл.: 17.

**Актуальність теми.** У сучасних інформаційно-телекомунікаційних системах спостерігається зростання обсягів мережевого трафіку, що супроводжується ускладненням форм і механізмів кібератак. Серед них особливу загрозу становлять DDoS-атаки та інші методи навмисного перевантаження ресурсів, здатні призводити до відмови сервісів, втрати доступності, затримок у передаванні даних і фінансових збитків. З огляду на масштаби можливих наслідків, важливим завданням є своєчасне виявлення аномальної активності та визначення характеру загроз для зниження ризиків порушення стабільності функціонування мережевої інфраструктури. У цьому контексті системи виявлення вторгнень (IDS) залишаються ключовим засобом технічного реагування на подібні виклики та підтримки кіберзахисту [1].

Водночас сучасний мережевий трафік демонструє значну варіативність і динаміку, а його поведінкова структура стає помітно складнішою. Це створює суттєві труднощі для традиційних IDS-підходів, що спираються на сигнатури або жорстко визначені правила. У багатьох ситуаціях такі системи виявляються недостатньо гнучкими, особливо коли йдеться про атаки, які змінюють свої ознаки чи намагаються імітувати легітимний трафік. За цих умов виникає потреба у вивченні більш адаптивних, інтелектуально орієнтованих підходів до класифікації, здатних працювати майже в реальному часі та зберігати ефективність у середовищі з високою мінливістю. Особливе значення набуває розвиток рішень, що забезпечують точніше виявлення різних типів атак, зокрема DDoS, із можливістю коригувати роботу відповідно до специфіки конкретного трафіку [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ідея дворівневої класифікації в IDS не є новою, і її результативність уже підтверджена низкою робіт. Наприклад, Rajouh та ін. запропонували дворівневу модель виявлення аномалій, у якій окремо обробляються «більшість» та «меншість» класів атак. Такий підхід дав змогу суттєво підвищити виявлення рідкісних атак і зменшити кількість помилок порівняно з одноетапними схемами. Експерименти на сучасних наборах даних, зокрема UNSW-NB15, продемонстрували, що дворівнева модель перевершує більшість актуальних методів [2]. Подібний напрям простежується і в роботі Azzaoui та Boukhamla (2020), де запропоновано двоетапну гібридну IDS: спершу бінарне розмежування Normal/Attack, а далі — визначення конкретного типу атаки. Система була протестована на наборах CICIDS2017 і NSL-KDD та показала високі показники точності й виявлення при мінімальному рівні хибних спрацювань [3], що додатково підтверджує ефективність дворівневих рішень для класифікації сучасних кіберзагроз.



Серед новіших прикладів варто згадати роботу Zhang та ін. (2023), де представлено дворівневу IDS-модель для IoT-мереж, побудовану на комбінації методів машинного і глибинного навчання. На першому етапі швидкий класифікатор LightGBM розмежовував нормальний і аномальний трафік, а на другому згортова нейромережа (CNN) виконувала детальну багатокласову класифікацію виявлених атак. Гібридна модель продемонструвала дуже високу ефективність: точність другого етапу сягнула близько 99,9%. У цілому система показала кращу стійкість до дисбалансу вибірки та перевершила інші сучасні методи на великому наборі даних CSE-CIC-IDS2018 [1], доводячи переваги дворівневих підходів над окремими моделями машинного чи глибинного навчання.

На сьогодні вже існують дворівневі IDS, у яких на першому етапі Naïve Bayes розмежовує трафік на нормальний і підозрілий, а далі метод Elliptic Envelope аналізує саме потенційно загрозливі записи [4]. Після другого етапу така система змогла досягти точності 98,59% на наборі CIC-IDS2017 [4], що помітно перевищує результати однорівневих моделей на цьому ж наборі. Для порівняння, запропонований авторами двоетапний підхід продемонстрував дещо вищу ефективність, ніж інші класичні алгоритми (зокрема дерева рішень і випадковий ліс) на CIC-IDS2017 [5]. Загальний висновок цих робіт однозначний: дворівневі схеми нерідко мають перевагу над однорівневими за точністю виявлення мережових атак [5].

Крім того, Rajouh та ін. у своїй дворівневій моделі відзначили суттєве поліпшення коефіцієнта виявлення атак за одночасного зниження рівня хибних спрацювань у порівнянні з попередніми методами [6]. Їхній підхід особливо вдало працював із рідкісними типами вторгнень, які раніше часто залишалися непоміченими (наприклад, атаки класів U2R та R2L) [6]. Подібний фокус на виявленні малорепрезентованих атак простежується і в інших роботах: наприклад, Huang та ін. використали генеративну модель Imbalanced GAN для синтезу недостатньо представлених атак, а подальша класифікація за допомогою CNN суттєво підвищила рівень їхнього виявлення на різних наборах даних [1]. Запропоновано й окремі методи ресемплінгу. Зокрема, Zhang та ін. створили комбінацію SMOTE з Gaussian Mixture (підхід SGM), і в поєднанні з CNN він показав відчутне покращення виявлення атак, що трапляються порівняно рідко [1]. У підсумку дворівневі методи аналізу трафіку можна вважати дієвим інструментом для IDS: поєднання швидкого фільтрування з точною багатокласовою моделлю дає змогу краще зрівноважити повноту виявлення атак і рівень хибних спрацювань. У багатьох роботах наголошується, що такі системи знижують False Positive Rate і водночас підвищують Detection Rate для нетипових атак [3].

Такий дворівневий підхід зараз набуває особливої ваги, зважаючи на стрімкий розвиток Інтернету речей (IoT) та промислового Інтернету (IIoT), де мережевий трафік зростає не просто швидко, а фактично безперервно й нерівномірно. У сучасних IoT-середовищах формується колосальний обсяг даних, і ці дані потрібно обробляти досить оперативно, причому з вимогою до точності, яка часто виходить за межі можливостей традиційних IDS. За таких умов дворівневі моделі виявляються практичнішими: вони краще витримують розбалансованість вибірок, менш чутливі до коливань у структурі трафіку та здатні масштабуватися, коли обсяги даних починають зростати стрибками. Показовим є приклад дворівневої IoT-IDS на основі глибокої рекурентної нейромережі (RNN), яка демонструвала виявлення атак – зокрема DoS – майже в реальному часі, з доволі високою чутливістю [1]. Загалом такі системи стабільно перевершують одноетапні рішення в великих і різномірних середовищах, забезпечуючи надійніший рівень захисту в умовах, коли кількість кіберзагроз не просто зростає, а й постійно змінює свої форми.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри активний розвиток напрямку дворівневих систем виявлення вторгнень (IDS), більшість доступних досліджень і далі зосереджується переважно на тестуванні моделей у межах статичних, наперед анотованих наборів даних, таких як CICIDS2017, UNSW-NB15 чи CSE-CIC-IDS2018. Такі на-

бори дійсно зручні для порівняння алгоритмів між собою, однак мають низку суттєвих обмежень: вони не відображають повною мірою динамічний характер реального трафіку, зберігають фіксований класовий розподіл і часто мають структуру, певною мірою вже адаптовану під навчання моделей. Через це виникає ризик переоцінити ефективність запропонованих підходів: класифікатори, що демонструють високу точність на таких наборах, можуть поводитися нестабільно в реальних мережах, особливо там, де присутній доменний зсув або з'являються нові типи трафіку [7; 8].

Ще однією помітною проблемою є відсутність послідовного порівняння дворівневої архітектури з її окремими етапами. У значній частині публікацій подаються лише підсумкові результати, однак не аналізується, як саме кожен компонент — скажімо, бінарний детектор або багатокласовий класифікатор — впливає на загальний показник якості. Подібне порівняння могло б окреслити внесок кожного рівня окремо, але його часто або ігнорують, або згадують лише побіжно [9; 10].

До цього додається ще одна системна прогалина: більшість робіт не включає тестування дворівневих IDS на потоковому чи неанотованому трафіку. Навіть ті дослідження, що позиціонують свої рішення як придатні для роботи в реальному часі або для IoT-середовищ, зазвичай покладаються на штучно згенеровані дані або обмежуються відтворенням заздалегідь зафіксованих сесій. У результаті між моделлю та її потенційним середовищем застосування формується відчутний розрив [11; 12].

**Постановка завдання.** Попри помітну увагу до розробки засобів виявлення вторгнень, задача побудови багатокласової класифікації атак в один етап і далі лишається непростю. Моделі, які мають не лише зафіксувати сам факт загрози, а й одразу визначити її тип, стикаються з цілою низкою обмежень: мережевий трафік надто неоднорідний, ознаки атак помітно змінюються залежно від контексту, а сама поведінка атак часто коригується або маскується під впливом середовища. У реальних умовах функціонування мереж додатково присутні численні фонові процеси, паралельна робота сервісів та постійні коливання параметрів потоків. Усе це істотно знижує ефективність загальних підходів і ускладнює створення стійких багатокласових класифікаторів [2].

За таких умов доцільним видається застосування підходів, які дають змогу зменшити складність задачі шляхом її поетапного розв'язання. Дворівнева модель у цьому контексті постає як конструктивна альтернатива: на першому рівні відбувається виокремлення підозрілих потоків за допомогою бінарної класифікації, що формує основу для більш стабільного і спеціалізованого аналізу на наступному етапі. На другому рівні можуть застосовуватися методи, орієнтовані на розмежування конкретних типів атак в умовах меншої варіативності. Така структурна організація відкриває можливість для підвищення точності класифікації, зменшення кількості хибних рішень та покращення адаптивності системи до особливостей мережевого середовища [2].

**Метою статті** є експериментальне підтвердження переваг дворівневого класифікатора над традиційними однорівневими підходами у задачі класифікації мережевого трафіку. Передусім йдеться про демонстрацію того, що послідовне виконання двох етапів — бінарного виявлення аномалій із подальшою багатокласовою класифікацією — дає вищі показники якості, ніж робота кожного з цих етапів окремо. Для досягнення мети необхідно:

- здійснити збір і класифікацію трафіку за допомогою дворівневої моделі, де на першому рівні використовується Naïve Bayes, а на другому – Random Forest;
- виміряти основні метрики (accuracy, precision, recall, F1) як для кожного рівня окремо, так і для системи загалом на єдиному наборі даних;
- порівняти результати та оцінити, наскільки саме дворівнева схема підвищує загальну ефективність класифікації, а також визначити, у чому полягає вигреш (наприклад, у зменшенні кількості хибнопозитивних спрацювань чи у кращому розпізнаванні окремих типів атак).

У підсумку мета полягає в обґрунтуванні доцільності застосування дворівневого підходу шляхом кількісного аналізу його ефективності на прикладі реальних даних. Очікується, що отримані результати покажуть: дворівнева архітектура не просто поєднає дві моделі, а й забезпечує відчутне покращення виявлення загроз у трафіку порівняно з використанням лише одного класифікаційного рівня.

**Методика дослідження.** Для експериментальної перевірки було побудовано дворівневу систему класифікації мережевих потоків. На першому рівні (бінарному класифікаторі) кожен потік відноситься або до класу «нормативний трафік», або до класу «потенційна загроза». Для цього етапу застосовано модель машинного навчання Naïve Bayes, оскільки саме вона показує стабільно високі результати у подібних задачах бінарного поділу [13]. Другий рівень — багатокласовий класифікатор — працює вже тільки з потоками, позначеними першим рівнем як «загроза», і розподіляє їх за конкретними типами атак. У межах цього дослідження враховувалися чотири види DoS-атак: Hulk, Slowhttptest, Slowloris, TCP-Flood, а також клас «нормативний». Додавання нормального трафіку на другий рівень дає змогу скоригувати можливі помилки першого етапу: якщо деякі безпечні потоки були хибно віднесені до підозрілих, другий класифікатор може повернути їх у нормальний клас.

Щоб формалізувати загальну логіку класифікації, запишемо її у вигляді математичних позначень.

Нехай  $x \in R^d$  — вектор ознак мережевого потоку. Тоді функція, яка виявляє, чи  $x$  є атакою (бінарна класифікація), може приймати наступні значення:

$$f_b(x) \in \{C_{\text{normative}}, C_{\text{threat}}\}, \quad (1)$$

де  $C_{\text{normative}}$  — клас нормальний трафік, а  $C_{\text{threat}}$  — зловмисний.

Позначимо сукупність відомих класів даних як вектор:

$$c_{\text{known}} = \{C_{\text{normative}}\} \cup \{C_{\text{hulk}}, C_{\text{slowhttptest}}, C_{\text{slowloris}}, C_{\text{tcpFlood}}\} \quad (2)$$

де  $C_{\text{normative}}$  — клас «нормальний трафік»,  $C_{\text{hulk}}$ ,  $C_{\text{slowhttptest}}$ ,  $C_{\text{slowloris}}$ ,  $C_{\text{tcpFlood}}$  — класи окремих атак, а  $C_{\text{unknown}}$  — клас, який описує випадок, коли модель не може визначити жоден з відомих класів.

Також прийемо, що функції багатокласової класифікації  $f_{rf}(x)$  та визначення загального результату  $f_r(x)$  будуть приймати наступні значення:

$$f_{rf}(x) \in c_{\text{known}} \cup \{C_{\text{unknown}}\}, \quad f_r(x) \in c_{\text{known}} \cup \{C_{\text{unknown}}\}. \quad (3)$$

Опишемо функцію, яка здійснює рішення при виявленні атак серед мережевих потоків.

$$f_b(x) = \begin{cases} C_{\text{threat}}, & P(C_{\text{threat}}|x) \geq T_b \vee P(C_{\text{normative}}|x) < T_b, \\ C_{\text{normative}}, & P(C_{\text{threat}}|x) < T_b \vee P(C_{\text{normative}}|x) \geq T_b \end{cases} \quad (4)$$

де  $P(C_i|x)$  — ймовірність належності потоку до класу  $C_i$ , а  $T_b$  — поріг спрацьовування бінарного класифікатора

Нехай  $K \in c_{\text{known}}$ , та  $K = \arg \max_k P(k|x)$ , де  $P(k|x)$  — ймовірність належності  $x$  до класу  $k$ , тоді запишемо функцію багатокласової класифікації як

$$f_{rf}(x) = \begin{cases} K, & P(K|x) \geq T_{rf} \\ C_{\text{unknown}}, & \text{інакше} \end{cases} \quad (5)$$

Тоді загальна логічна функція дворівневого класифікатора буде мати такий вигляд:

$$f_r(x) = \begin{cases} C_{\text{normative}}, & f_b(x) = C_{\text{normative}} \\ f_{rf}(x), & f_b(x) = C_{\text{threat}} \end{cases} \quad (6)$$

а процес класифікації для кожного рівня —  $\hat{y}_i = f_j(x_i)$ , де  $f_j \in \{f_b, f_{rf}, f_r\}$ , з яких  $f_b$  використовується на першому етапі для бінарної класифікації,  $f_{rf}$  — на другому етапі для багатокласової,  $f_r$  — загальний класифікатор, який включає використання попередніх функцій.

Після класифікації для оцінки ефективності моделі використаємо наступні показники, які характеризують правильність класифікації даних для кожного класу (як для етапу бінарної, так і етапу багатокласової класифікації, а також для результату дворівневої класифікації).

$$TP_k = \sum_{i=1}^N \mathbb{1}_{\{y_i=c_k\}} \cdot \mathbb{1}_{\{\hat{y}_i=c_k\}} \quad (7)$$

$TP_k$  — кількість об'єктів класу  $C_k$ , які модель правильно класифікувала як  $C_k$ .

$$FP_k = \sum_{i=1}^N \mathbb{1}_{\{y_i \neq c_k\}} \cdot \mathbb{1}_{\{\hat{y}_i=c_k\}} \quad (8)$$

$FP_k$  — кількість об'єктів інших класів, які модель помилково віднесла до  $C_k$ .

$$FN_k = \sum_{i=1}^N \mathbb{1}_{\{y_i=c_k\}} \cdot \mathbb{1}_{\{\hat{y}_i \neq c_k\}} \quad (9)$$

$FN_k$  — кількість об'єктів класу  $C_k$ , які модель помилково віднесла до інших класів.

$$TN_k = \sum_{i=1}^N \mathbb{1}_{\{y_i \neq c_k\}} \cdot \mathbb{1}_{\{\hat{y}_i \neq c_k\}} \quad (10)$$

$TN_k$  — кількість об'єктів, що не належать до  $C_k$ , і були правильно класифіковані як не  $C_k$ .

Для всіх вищезазначених формул:  $y_i$  — істинна мітка для  $i$ -го прикладу,  $\hat{y}_i$  — передбачена мітка для  $i$ -го прикладу,  $C_k$  — цільовий клас,  $N$  — кількість класів.

$$Accuracy = \frac{\sum_{k=1}^K TP_k}{\sum_{k=1}^K (TP_k + FP_k + FN_k)} \quad (11)$$

Accuracy — показує частку правильно класифікованих прикладів серед усіх, використовується для загальної оцінки точності моделі [11; 14; 15; 16].

$$Precision = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{TP_k}{TP_k + FP_k} \quad (12)$$

Precision — показує, яка частка передбачень для певного класу була дійсно правильною, важлива при контролі хибнопозитивних спрацювань. У такому разі вона розраховується з макроусередненням, тобто як середнє арифметичне цієї метрики для усіх класів [11; 14; 15; 16].

$$Recall = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{TP_k}{TP_k + FN_k} \quad (13)$$

Recall — відображає, яку частку прикладів певного класу модель змогла правильно знайти, критична при мінімізації пропусків (особливо атак). Також розраховується з макроусередненням [11; 13; 14; 15].

$$F1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (14)$$

F1-score — є гармонійним середнім Precision і Recall, застосовується для балансування між чутливістю та точністю, особливо у випадках із дисбалансом класів [11; 14; 15; 16].

**Результати дослідження.** Експериментальна перевірка ефективності моделі проводилася окремо для кожного з рівнів класифікації та для системи загалом. Далі подано динаміку метрик класифікації за різних типів трафіку. Було перевірено роботу двох варіантів моделі — одна була навчена на публічному наборі даних USB-IDS-1, інша на наборі даних, зібраному в тій же віртуальній мережі, де проводилось тестування моделі. Для цього було здійснено серію класифікаційних запусків, де трафік оброблявся вікнами по 60 секунд (для якісного виявлення повільних DDoS-атак). У табл. 1 описано загальні показники тестових записів. Для всього зловмисного трафіку у віртуальній мережі додавались референтні мітки ( $y_i$ ), які дозволили здійснити розрахунок метрик та оцінити ефективність роботи моделі.

Таблиця 1 – Кількісний опис мережесих даних, оброблених класифікаційними моделями

| Дані               | Загальна кількість оброблених потоків | Середня кількість потоків у вікні | Кількість вікон | Середня тривалість обробки одного вікна (секунд) |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------------------------|
| <b>USB-IDS-1</b>   | 63 952                                | 789.53                            | 81              | 0.1860                                           |
| <b>Власні дані</b> | 51 967                                | 626.11                            | 83              | 0.2434                                           |

Джерело: розроблено авторами.

Захоплення трафіку та його подальша класифікація виконувалися у віртуальному середовищі [17] у вигляді груп вікон, у кожній з яких генерувався нормативний трафік, що слугував фоновим «шумом». Одна з груп містила лише нормативний трафік і використовувалася як еталон. Ще чотири групи, крім нормального трафіку, включали по одній атаці з набору Hulk, Slowhttptest, Slowloris та TCPFlood. Окрема група вікон містила всі чотири атаки одночасно разом із нормативним трафіком. На рис. 1 подано значення основних метрик для кожного вікна на кожному рівні класифікації для моделі, навченої на наборі USB-IDS-1. Зі структури цих результатів видно, що перший рівень класифікації добре впорається з розпізнаванням як нормального трафіку, так і атак за наявності Hulk, а також за умов змішаних сценаріїв. Водночас для нормального трафіку та атак типу Slowloris, Slowhttptest і TCPFlood ефективність бінарного класифікатора помітно нижча. Частину цих помилок компенсує другий рівень багатокласової класифікації, що додатково підтверджує доцільність включення класу «нормативний» у другий етап. Наприклад, для атаки TCPFlood значення F1 на першому рівні тримається поблизу 0,2, тоді як після другого рівня загальна оцінка підвищується до понад 0,4.

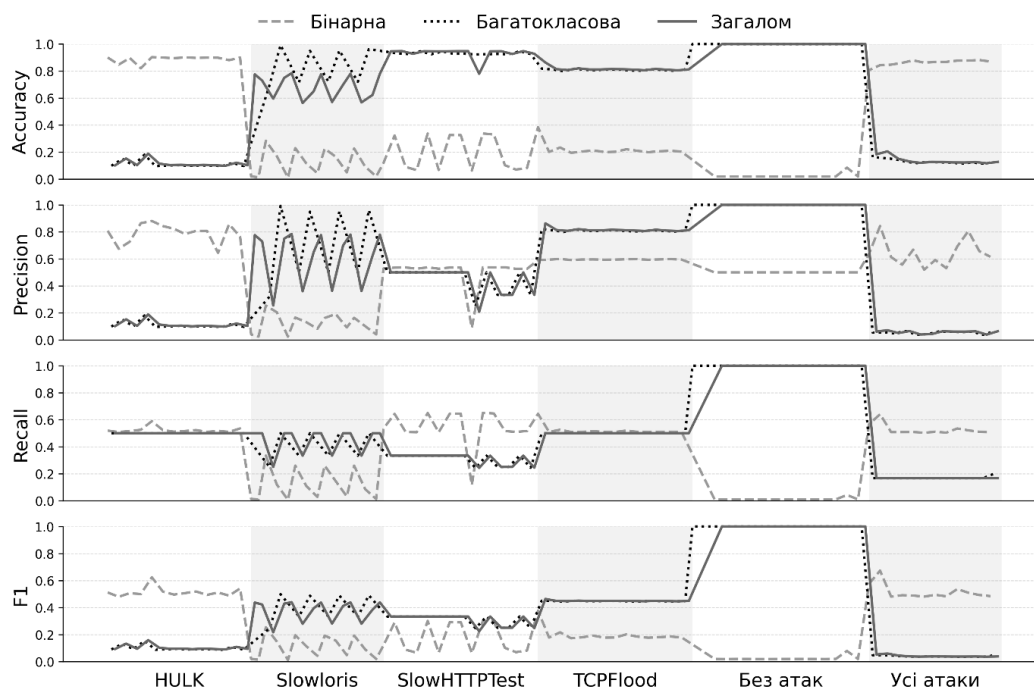


Рис. 1. Зміна метрик класифікації залежно від типу трафіку (модель навчена набором USB-IDS-1)

Джерело: розроблено авторами.

На рис. 2 наведені метрики для моделі, навченої вже на власноруч зібраних даних. З цих результатів можна бачити, що перший етап класифікації демонструє впевнене розпізнавання атак для всіх комбінацій трафіку, хоча оцінки дещо знижуються у випадку нормального трафіку та атак Slowhttptest і Slowloris.

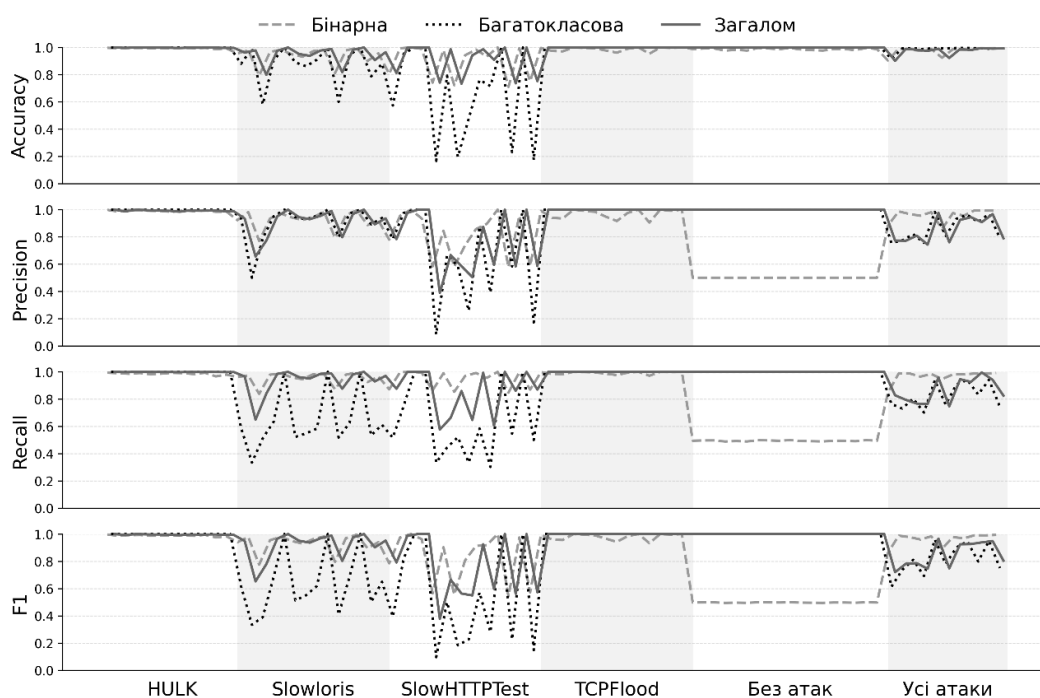


Рис. 2. Зміна метрик класифікації залежно від типу трафіку  
(модель навчена набором власних даних)

Джерело: розроблено авторами.

Загалом другий рівень мультикласової класифікації також підвищує ефективність моделі, однак його внесок тут менш виражений, ніж у випадку моделі, навченої на USB-IDS-1. Ймовірно, це пояснюється тим, що модель, тренувана на власних даних, краще узгоджена з параметрами мережі, у якій відбувалося тестування, і тому перший рівень уже справляється з виявленням атак значно впевненіше. Відповідно, потреба в «корекції» помилок на другому рівні є меншою, ніж у попередньому випадку.

Для узагальнення результатів обчислено середні значення метрик за всіма вікнами класифікації, а також розраховано діапазон значень (min–max) у межах кожної серії. Розглянемо детально числові показники метрик (таблиця 2). В ній відображено середні значення метрик для усіх запусків, згруповані за моделлю (навченою на наборі USB-IDS-1 та наборі власних даних).

Таблиця 2 – Загальні значення метрик для дворівневої класифікаційної моделі

| Метрики   |                   | Accuracy |           | Precision |            | Recall |           | F1    |           |
|-----------|-------------------|----------|-----------|-----------|------------|--------|-----------|-------|-----------|
| Дані      | Етап класифікації | сер.     | Діапазон  | сер.      | Діапазон   | сер.   | Діапазон  | сер.  | Діапазон  |
| Власні    | Двійкова          | 0,963    | 0,71–1,00 | 0,834     | 0,50–1,00  | 0,865  | 0,49–1,00 | 0,83  | 0,49–1,00 |
|           | Багатокласова     | 0,917    | 0,17–1,00 | 0,909     | 0,08–1,00  | 0,854  | 0,30–1,00 | 0,835 | 0,10–1,00 |
|           | Загальні оцінки   | 0,970    | 0,73–1,00 | 0,922     | 0,39–1,00  | 0,946  | 0,58–1,00 | 0,923 | 0,38–1,00 |
| USB-IDS-1 | Двійкова          | 0,366    | 0,01–0,90 | 0,519     | 0,02–0,88  | 0,369  | 0,01–0,65 | 0,246 | 0,01–0,67 |
|           | Багатокласова     | 0,668    | 0,09–1,00 | 0,560     | 0,03–1,00  | 0,532  | 0,17–1,00 | 0,439 | 0,03–1,00 |
|           | Загальні оцінки   | 0,633    | 0,09–1,00 | 0,525     | 0,04–1,000 | 0,495  | 0,17–1,00 | 0,391 | 0,04–1,00 |

Джерело: розроблено авторами.

З цієї табл. 2 видно, що для моделі навченої набором USB-IDS-1 загальні оцінки ефективності перевищують оцінки першого рівня (в 1,3–1,7 раза для деяких оцінок, наприклад F1-score для цієї моделі зростає з 0,246 до 0,391 (у 1,6 раза). Для моделі навченої на власному наборі даних загальні оцінки також перевищують оцінки першого рівня, що правда, не так

значно, як для попереднього випадку. Також з таблиці видно, що для даних характерних для мережі, у якій проводились випробування, діапазон значень оцінок є меншим, порівняно з моделлю навченою на нехарактерних даних із набору USB-IDS-1, а отже, пристосування класифікаційної моделі підвищує як ефективність, так і стабільність роботи моделі.

Таким чином, модель, навчена на специфічних для середовища даних, демонструє не лише вищу ефективність, але й більшу стабільність оцінок. Це вказує на переваги адаптації класифікаторів до конкретного типу трафіку. Отже, результати експериментів підтверджують основну гіпотезу: дворівневий класифікатор демонструє вищу ефективність, ніж кожен із його етапів окремо. Така архітектура поєднує високий рівень виявлення атак із досить точним розмежуванням їхніх типів, що загалом сприяє зниженню кількості хибних спрацювань. Дворівнева схема дозволяє використовувати сильні сторони кожного етапу, вирішуючи дві підзадачі послідовно й з окремо підібраними налаштуваннями. У результаті формується більш надійна та точна система моніторингу мережевого трафіку.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** У статті було проаналізовано ефективність дворівневої класифікаційної архітектури для задач виявлення мережевих атак і уточнення їхнього типу. Запропонована система поєднує бінарну модель на основі Naïve Bayes, що виконує первинний відсів потенційно шкідливих потоків, із багатокласовим класифікатором Random Forest, який уточнює тип загрози. Такий поділ дозволяє окремо оптимізувати роботу кожного рівня: перший – на максимальне виявлення атак (високий recall), другий – на точність класифікації (високий precision). Проведений експериментальний аналіз на двох джерелах (USB-IDS-1 та власноруч зібраний трафік у віртуальному середовищі) засвідчив, що ця архітектура перевершує кожен етап окремо за точністю, F1-мірою та загальною збалансованістю показників.

Зокрема, макроусереднені метрики показали, що порівняно з бінарним класифікатором, повна система забезпечує підвищення F1-міри приблизно у 1,3–1,6 рази залежно від набору даних. Крім того, підтверджено, що другий рівень частково компенсує помилки першого – особливо тоді, коли перший рівень демонструє високу чутливість, але має недостатню специфічність.

Таким чином, усі задачі, сформульовані у межах поставленої мети, були виконані: проведено навчання класифікаторів на двох наборах, обчислено метрики окремо для кожного рівня та об'єднаної системи, проаналізовано приріст ефективності від дворівневої архітектури, а також підтверджено її стабільність на різних типах трафіку. Отримані результати обґрунтовують доцільність використання дворівневого підходу у задачах виявлення атак як з погляду точності, так і адаптивності.

Подальші дослідження можуть розвиватися в кількох напрямках. По-перше, варто розширити набір атак, які розпізнає другий рівень, і розглянути механізми роботи з невідомими типами загроз (zero-day), зокрема через методи open-set recognition. По-друге, перспективним виглядає вивчення інших комбінацій моделей на кожному рівні – передусім із залученням глибоких нейронних архітектур або адаптивних баєсівських методів. По-третє, необхідно розглядати застосування цієї архітектури в потокових, неанотованих середовищах і оцінювати її продуктивність у режимі реального часу: затримки класифікації, пропускну здатність, ресурсні витрати тощо. З урахуванням цих аспектів дворівнева модель може стати основою для побудови практичної, масштабованої системи виявлення атак у сучасних мережах.

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

Під час написання цього матеріалу автор(и) не використовували технологій на основі штучного інтелекту.

**Список використаних джерел**

1. Zhang, H., Zhang, B., Huang, L., Zhang, Z., & Huang, H. (2023). An efficient two-stage network intrusion detection system in the internet of things. *Information*, 14(2), 77. <https://doi.org/10.3390/info14020077>.
2. Zong, W., Chow, Y.-W., & Susilo, W. (2018). A two-stage classifier approach for network intrusion detection. *У Information security practice and experience* (с. 329–340). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99807-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99807-7_20)
3. Azzaoui, H., & Boukhamla, A. (2020). Two-Stages intrusion detection system based on hybrid methods. *У ICIST '20: 10th international conference on information systems and technologies*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3447568.3448512>.
4. Dubey, A. K., Singh, V., Sadaf, S., Sowjanya, G., Dehariya, K., & Mangal, A. (2023). Network traffic classification methods: A survey. *International Journal of Applied Engineering & Technology*, 5(4), 3731–3740.
5. Hewapathirana, I. U. (2025). A comparative study of two-stage intrusion detection using modern machine learning approaches on the CSE-CIC-IDS2018 dataset. *Knowledge*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/knowledge5010006>
6. Pajouh, H. H., Dastghaibifard, G., & Hashemi, S. (2015). Two-tier network anomaly detection model: A machine learning approach. *Journal of Intelligent Information Systems*, 48(1), 61–74. <https://doi.org/10.1007/s10844-015-0388-x>
7. Ahamed, M. K. U., & Karim, A. (2025). Cascaded intrusion detection system using machine learning. *Systems and Soft Computing*, 200182. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200182>
8. Goldschmidt, P., & Chudá, D. (2025). Network intrusion datasets: A survey, limitations, and recommendations. *Computers & Security*, 104510. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104510>
9. Alshammari, F., & Alsaleh, A. (2025). Smart intrusion detection model to identify unknown attacks for improved road safety and management. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03604-5>.
10. Khamees, M. K., Ismail, M. A., Yunan, U., & Kasim, S. (2018). Review on intrusion detection system based on the goal of the detection system. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(6). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.06.028>.
11. Bagui, S., Mink, D., Bagui, S., Subramaniam, S., & Wallace, D. (2023). Resampling imbalanced network intrusion datasets to identify rare attacks. *Future Internet*, 15(4), 130. <https://doi.org/10.3390/fi15040130>.
12. Khraisat, A., Gondal, I., Vamplew, P., & Kamruzzaman, J. (2019). Survey of intrusion detection systems: Techniques, datasets and challenges. *Cybersecurity*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7>.
13. Konyrbaev, N., Nikitenko, Y., Shtanko, V., Lakhno, V., Baishemirov, Z., Ibadulla, S., Galymzhankyzy, A., & Myrzabek, E. (2024). Evaluation and optimization of the naive bayes algorithm for intrusion detection systems using the USB-IDS-1 dataset. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2 (132)), 74–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317471>
14. Chelloug, S. A. (2024). A robust approach for multi classification-based intrusion detection through stacking deep learning models. *Computers, Materials & Continua*, 1–10. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.051539>.
15. Zayid, E. I. M., Isah, I., Humayed, A. A., & Adam, Y. A. (2025). Innovating intrusion detection classification analysis for an imbalanced data sample. *Information*, 16(10), 883. <https://doi.org/10.3390/info16100883>.
16. Bagui, S., & Li, K. (2021). Resampling imbalanced data for network intrusion detection datasets. *Journal of Big Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00390-x>.
17. Штанько, В., & Нікітенко, Е. (2025). Проектування та реалізація віртуального середовища для аналізу мережевого трафіку. *Наука і техніка сьогодні*, (7(48)). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7\(48\)-2028-2045](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-2028-2045).

**References**

1. Zhang, H., Zhang, B., Huang, L., Zhang, Z., & Huang, H. (2023). An efficient two-stage network intrusion detection system in the internet of things. *Information*, 14(2), 77. <https://doi.org/10.3390/info14020077>



2. Zong, W., Chow, Y.-W., & Susilo, W. (2018). *A two-stage classifier approach for network intrusion detection*. In *Information security practice and experience* (pp. 329–340). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99807-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99807-7_20).
3. Azzaoui, H., & Boukhamla, A. (2020). Two-Stages intrusion detection system based on hybrid methods. *Y ICIST '20: 10th international conference on information systems and technologies*. ACM. <https://doi.org/10.1145/3447568.3448512>.
4. Dubey, A. K., Singh, V., Sadaf, S., Sowjanya, G., Dehariya, K., & Mangal, A. (2023). Network traffic classification methods: A survey. *International Journal of Applied Engineering & Technology*, 5(4), 3731–3740.
5. Hewapathirana, I. U. (2025). A comparative study of two-stage intrusion detection using modern machine learning approaches on the CSE-CIC-IDS2018 dataset. *Knowledge*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.3390/knowledge5010006>.
6. Pajouh, H. H., Dastghaibfard, G., & Hashemi, S. (2015). Two-tier network anomaly detection model: A machine learning approach. *Journal of Intelligent Information Systems*, 48(1), 61–74. <https://doi.org/10.1007/s10844-015-0388-x>.
7. Ahamed, M. K. U., & Karim, A. (2025). Cascaded intrusion detection system using machine learning. *Systems and Soft Computing*, 200182. <https://doi.org/10.1016/j.sasc.2024.200182>.
8. Goldschmidt, P., & Chudá, D. (2025). Network intrusion datasets: A survey, limitations, and recommendations. *Computers & Security*, 104510. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2025.104510>.
9. Alshammari, F., & Alsaleh, A. (2025). Smart intrusion detection model to identify unknown attacks for improved road safety and management. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03604-5>.
10. Khamees, M. K., Ismail, M. A., Yunan, U., & Kasim, S. (2018). Review on intrusion detection system based on the goal of the detection system. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(6). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.06.028>.
11. Bagui, S., Mink, D., Bagui, S., Subramaniam, S., & Wallace, D. (2023). Resampling imbalanced network intrusion datasets to identify rare attacks. *Future Internet*, 15(4), 130. <https://doi.org/10.3390/fi15040130>.
12. Khraisat, A., Gondal, I., Vamplew, P., & Kamruzzaman, J. (2019). Survey of intrusion detection systems: Techniques, datasets and challenges. *Cybersecurity*, 2(1). <https://doi.org/10.1186/s42400-019-0038-7>.
13. Konyrbaev, N., Nikitenko, Y., Shtanko, V., Lakhno, V., Baishemirov, Z., Ibadulla, S., Galymzhankyzy, A., & Myrzabek, E. (2024). Evaluation and optimization of the naive bayes algorithm for intrusion detection systems using the USB-IDS-1 dataset. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2 (132)), 74–82. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317471>.
14. Chelloug, S. A. (2024). A robust approach for multi classification-based intrusion detection through stacking deep learning models. *Computers, Materials & Continua*, 1–10. <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.051539>.
15. Zayid, E. I. M., Isah, I., Humayed, A. A., & Adam, Y. A. (2025). Innovating intrusion detection classification analysis for an imbalanced data sample. *Information*, 16(10), 883. <https://doi.org/10.3390/info16100883>.
16. Bagui, S., & Li, K. (2021). Resampling imbalanced data for network intrusion detection datasets. *Journal of Big Data*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00390-x>.
17. Shtanko, V., & Nikitenko, Ye. (2025). ). Proiektuvannia ta realizatsiia virtualnoho seredovyshcha dlia analizu merezhevoho trafiku. [Design and implementation of a virtual environment for network traffic analysis.] *Nauka i tekhnika sohodni - Science and technology today*, (7(48)). [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7\(48\)-2028-2045](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-2028-2045).
18. Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.12.2025

**Vadym Shtanko<sup>1</sup>, Yevheniy Nikitenko<sup>2</sup>,**

<sup>1</sup>PhD Student, Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [vadym.shtanko@nubip.edu.ua](mailto:vadym.shtanko@nubip.edu.ua), **ORCID** <https://orcid.org/0009-0001-4977-1450>

<sup>2</sup>PhD in Physical and Mathematical Sciences,  
Associate Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity  
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)  
**E-mail:** [ev.nikitenko@nubip.edu.ua](mailto:ev.nikitenko@nubip.edu.ua), **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-9222-644X>

## EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF A TWO-LEVEL NETWORK FLOW CLASSIFIER

*The growing complexity of cyber threats, especially multi-vector DDoS attacks, together with the rapid increase and heterogeneity of network traffic, creates a clear need for intrusion detection systems that can remain effective under highly dynamic network conditions. This work is motivated by the observation that conventional IDS approaches often fail to provide timely and reliable recognition of sophisticated attacks when they are hidden within large volumes of background traffic. For the field of information technology, it is therefore important to develop models that not only deliver high classification quality but can also be realistically applied in scenarios that are close to real time. At the same time, direct single-stage multiclass classification of network attacks remains a difficult task: traffic behaviour is highly variable, signatures of different threats can overlap with normal flows, and changes in the network environment directly affect the stability and consistency of the results. Addressing this challenge is essential for improving IDS reliability and for ensuring that attack types are correctly distinguished under changing traffic conditions. The aim of this study is to design and experimentally evaluate a two-level classification model that combines initial separation of suspicious flows with subsequent refinement of attack types, with the goal of achieving more stable and informative diagnostics. To reach this aim, machine-learning methods were employed, and dedicated tools for collecting, aggregating, and labeling traffic were developed and used. The proposed model was tested both on the public USB-IDS-1 dataset and on a custom traffic dataset generated in a controlled virtual environment. The main results of the study show improved consistency of classification, a reduction in misclassification events, and increased robustness of the model to changes in the operating environment. Overall, the two-level approach demonstrated practical effectiveness and potential for deployment in modern network-security monitoring systems, confirming that the stated research objectives have been achieved.*

**Keywords:** traffic classification; two-level model; attack detection; Naïve Bayes; Random Forest; cybersecurity.

*Fig.: 2. Table: 3. References: 17.*

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-277-285](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-277-285)

УДК 681.518.3:528

**Микола Олегович Бялий<sup>1</sup>, Ігор Володимирович Пампуха<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ад'юнкт штатний науково-організаційного відділу

Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: [nikolai.bialiy@gmail.com](mailto:nikolai.bialiy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-9487-1502><sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, Начальник науково-дослідного центру

Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: [igor.pampukha@knu.ua](mailto:igor.pampukha@knu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4807-3984>

## АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ЩОДО ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Геоінформаційна система військового призначення (ГІС ВП) – типова динамічна складна організаційна система. Наявний інструментарій ГІС сприяє ефективній підготовці, обробки й візуалізації просторових даних, дозволяє інтегрувати різні джерела даних та аналізувати просторові взаємозв'язки між різними чинниками. При цьому ГІС ВП повинна бути гнучкою, щоб мати можливість адаптуватися до умов, що постійно зазнають змін, удосконалення існуючих систем для задоволення конкретних військових потреб. Це може допомогти визначити оптимальні стратегії управління шляхом моделювання взаємодії між військами і особами, що приймають рішення (ОПР).

Задача оптимізації ГІС належить до числа задач, пов'язаних з оптимізацією складних автоматичних систем і які ґрунтуються на класичних і сучасних математичних методах: варіаційне обчислення, теорія статистичних рішень, теорія ігор, теорія дослідження операцій, теорія інформації, теорія ймовірності, метод Понтрягіна, метод динамічного програмування Беллмана тощо. Це складна, нетривіальна задача, яка потребує врахування великої кількості характеристик території бойових дій, передбачає її інтеграцію з теорією ігор, моделями багатокритеріального прийняття рішень, розробкою і удосконаленням спеціальних алгоритмів.

Представлені результати розробки підходів щодо пошуку оптимізації ГІС ВП. Запропоновані підходи щодо оптимізації.

**Ключові слова:** геоінформаційна система (ГІС); геопросторові дані; геоінформаційні системи військового призначення (ГІС ВП).

Рис.: 1. Бібл.: 6.

**Актуальність теми та постановка проблеми** викликана необхідністю удосконалення наявного програмного забезпечення ГІС ВП та її структури, які дадуть можливість ефективно використовувати наявне озброєння ЗСУ та отримувати перевагу на полі бою.

Множина наявних і майбутніх перспективних функцій ГІС ВП визначає не тільки напрями підвищення ефективності ЗСУ, але також підкреслює необхідність їхнього безперервного вдосконалення.

Ефективність ГІС ВП залежить від системного і комплексного удосконалення її структури та архітектури на базі можливостей сучасних цифрових технологій, серед яких найбільш перспективними виступають технології штучного інтелекту, інтелектуального аналізу даних.

**Мета дослідження** – пошук підходів щодо оптимізації ГІС ВП для забезпечення командного складу Збройних Сил України (ЗСУ) різних рівнів актуальними даними, для підготовки й прийняття ефективних управлінських рішень. Використанні ГІС ВП забезпечує комплекс якісно нових методів, передусім в аспекті просторового планування бойових дій, розвинутого інструментарію аналізу й моделювання просторових даних і зручними засобами подання одержаних результатів.

**Основними завданнями дослідження є:**

- огляд літературних джерел та наукових публікацій, стосовно створення оптимальної структури ГІС ВП;

- аналіз підходів щодо пошуку оптимальної структури ГІС ВП.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Розвитку математичних методів дослідження складних систем присвячені праці вчених Глушкова В. М., Згуровського М. З., Івахненка О. Г., Самарського О. А. Значний внесок у розвиток технологій імітаційного моделювання внесли учені Бусленко Н. П., Зайцев В. Г., Кельтон В., Литвинов В. В., Лоу А., Прицкер А., Тимченко А. А., Томашевський В. М., Шеннон Р., Шрайбер Т. Дж. та ін.

Визначаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблеми оптимізації структури геоінформаційних систем військового призначення (ГІС ВП) ще далекі від свого вирішення.

**Виклад основного матеріалу.** Пошук оптимальної структури ГІС ВП передбачає використання методів багатокритеріального аналізу рішень, таких як метод аналізу ієрархій (МАІ), вибір систем керування баз даних (СКБД), аналіз алгоритмів побудови тривимірних моделей місцевості тощо та пошук підходів щодо забезпечення ефективного введення, збереження та подання даних.

Геоінформаційна система військового призначення (ГІС ВП) є складною системою, що визначається складністю своїх підсистем і на яку крім впливу відомих і чітко визначених факторів, здійснюється ще вплив стохастичних факторів. Відповідно до цього поведінка підсистем часто виявляється непередбачуваною. Другою особливістю ГІС ВП є її ієрархічність, тобто компоненти цієї системи також є складними системами, які мають свою поведінку, стан і структуру, свої зворотні зв'язки, спостережувані входи і виходи. Третьою особливістю ГІС ВП є її цілісність, тобто всі її частини системи працюють на найкращий (оптимальний) результат та емерджентність.

Пошук оптимального варіанту ГІС ВП це складна, нетривіальна задача, яка потребує врахування великої кількості характеристик території бойових дій (театру бойових дій), пов'язаних складними залежностями. Задача оптимізації ГІС належить до числа задач, пов'язаних з оптимізацією складних автоматичних систем і які ґрунтуються на класичних і сучасних математичних методах: варіаційне обчислення, теорія статистичних рішень, теорія ігор, теорія дослідження операцій, теорія інформації, теорія імовірності, метод Понтрягіна, метод динамічного програмування Беллмана тощо.

ГІС ВП можна оптимізувати шляхом її декомпозиції більш дрібні (прості) компоненти або модулі, що дасть можливість впроваджувати різні мови програмування для розв'язку конкретних задач та відключати ті модулі, що для заданої задачі не використовуються, підвищуючи тим самим її ефективність.

Незалежно від обраного підходу до оптимізації ГІС ВП особливу увагу потрібно акцентувати на підсистеми введення даних з різних джерел включаючи карти та матеріали дистанційного зондування Землі (ДЗЗ); збереження і швидкого видобутку даних для наступного аналізу, інструментарію для оцінки параметрів, розв'язку складних аналітично-обчислювальних задач; можливості подання даних у різних форматах, таких як карти, цифрові моделі рельєфу, зображення для ОПР.

Алгоритм оцінки ефективності й оптимізації ГІС запропонований [1] і був доопрацьований автором представлений на рис. 1.

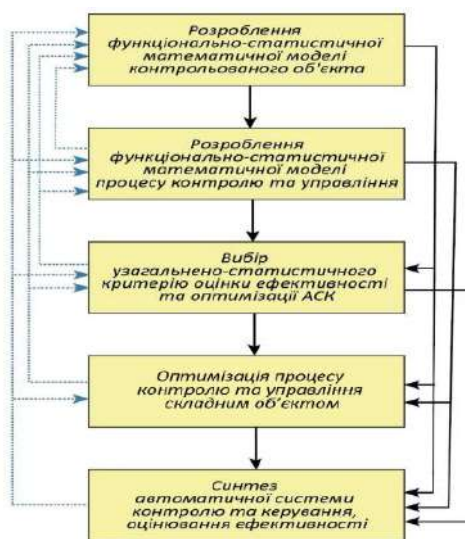


Рис. 1. Алгоритм оцінки ефективності і оптимізації ГІС

**Математична функціонально-статистична модель.** Найбільш повно стан об'єкта дослідження характеризує його математична функціонально-статистична модель (МФСМ), під якою розуміють систему рівнянь, що описує залежність параметрів об'єкта дослідження від зовнішніх і внутрішніх впливів в процесі функціонування ГІС ВП. На основі аналізу цієї моделі з'являється можливість формулювання основних задач, які повинні розв'язуватись ГІС ВП та синтезувати оптимальну структуру ГІС.

При побудові МФСМ необхідно враховувати те, що вона включає в себе різноманітні класи і види систем. Ці системи можуть бути автономними і неавтономними, замкнутими і розімкнутими, стаціонарними і нестаціонарними, безперервними і дискретними. Тому доцільно використовувати загальний математичний апарат, який при відповідних змінах може бути поширений на різноманітні часткові випадки.

Крім того, при побудові МФСМ об'єкта ураховуються основні параметри критеріїв, за якими виконується оптимізація характеристик процесу контролю [1; 2]. До таких параметрів належать:

- час протікання процесу загалом і його складових;
- імовірність безвідмовної роботи і імовірності виконання задачі різними системами, що входять в об'єкт дослідження і ГІС ВП;
- точність роботи різних систем, їх вага, об'єм, вартість, споживана енергія та інші важливі показники.

Збурений стан об'єкта дослідження при моніторингу і управлінні можна описати наступною системою рівнянь, яка в загальному випадку є математичною функціональною моделлю [1,2].

$$\sum_p^m M_{lp}(t, \tau, d/dt, Q) x_p = F_l(t, \tau, X, Z); \quad l = 1, 2, \dots, m, \quad (1)$$

де  $X \{x_1, \dots, x_m\}$  – вектор випадкових функцій часу, який характеризує вихідні параметри об'єкта дослідження;

$Z \{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$  – вектор випадкових функцій часу, який характеризує зовнішні і внутрішні збурення і керуючі впливи;

$F_l$  – нелінійна функція;

$M_{lp}(t, \tau, d/dt, Q)$  – багаточлен відносно операторів диференціювання  $d/dt$  зі змінним у часі вектором коефіцієнтів  $Q \{q_1, \dots, q_n\}$ ;

$t$  – поточне значення часу;

$\tau$  – момент часу, до якого ведеться дослідження об'єкта.

В процесі моніторингу стану театру бойових дій, яка є динамічною системою і перебуває під впливом керуючих впливів і збурень, визначається вихідними параметрами, певним чином пов'язаними з впливами на систему через відповідний системі рівнянь (1) вектор-оператор динамічної системи, заданий або сукупністю математичних операцій  $A_{lp}(t, \tau, X, Z, Q)$ , або сукупністю лінійних або нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx_i}{dt} = F_{0i}(t, \tau, X, Z) \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$\xi_j = \sum_{i=1}^{k'} \xi_{ij}^0(t, \tau, X) \bar{\xi}_i;$$

де  $\xi_{ij}^0$  – не випадкові координатні функції;

$\bar{\xi}_i$  – випадкові коефіцієнти;

$F_{0i}$  – не випадкові нелінійна функція.

Кожній групі номінальних умов при  $t = \tau_0, \xi_{01}, \dots, \xi_{0k}$  з номінальної області  $G_0$  і початкових умов  $x_{01}, \dots, x_{0m}$  відповідає своє рішення системи рівнянь (2):

$$x_{i0} = \varphi_{i0}(\tau_0, \tau, x_{01}, \dots, x_{0m}, \overline{\xi_{01}}, \dots, \overline{\xi_{0k}}). \quad (3)$$

Кожній групі реальних умов в моменти часу  $t = \tau_1, x'_{01}, \dots, x'_{0m}, \xi_1, \dots, \xi_k, t = \tau_1$ , реальній області  $G_1$  відповідає реальне рішення системи рівнянь (2):

$$x_i = \varphi_i(x'_{01}, \dots, x'_{0m}, \overline{\xi_1}, \dots, \overline{\xi_k}, \tau_1, \tau). \quad (4)$$

Система рівнянь (4) як за числом нелінійних операторів, так і за числом вихідних параметрів може розпадатися на  $m$  окремих рівнянь [1].

Для простоти будемо вважати, що кількість вихідних параметрів дорівнює кількості операторів, хоча, взагалі їх може бути більше. Для  $i$ -го параметра система рівнянь (1) вироджується в рівняння:

$$M_{i\rho}(t, \tau, d/dt, q, \dots, q_n)x_\rho = F_i(t, \tau, x_i, \xi_1, \dots, \xi_k). \quad (5)$$

Розгляд рівняння збуреного стану об'єкта дозволяє виконати функціональний аналіз стану об'єкта, синтез системи контролю і оцінку її ефективності. Однак більш повною характеристикою статичного і динамічного стану об'єкта є імовірнісний опис за допомогою законів розподілу імовірностей параметрів елементів вхідних впливів, вихідних параметрів і векторів-операторів. Оскільки імовірності раптових відмов визначаються за відомими формулами теорії надійності, то основна увага звертається на визначення імовірності появи поступових відмов. Запропонована модель відображує детерміновані і статистичні властивості, що визначають зміну характеристик і параметрів об'єкта.

Для визначення імовірності поступових відмов можуть бути застосовані три математичні моделі [1]:

- математична модель, заснована на методі інтегрування диференціальних рівнянь;
- математична модель, заснована на методі Монте-Карло;
- математична модель, заснована на методі квазілінійних збурень.

Під методом інтегрування диференціальних рівнянь розуміється метод прямого обчислення багатомірних щільностей ймовірностей вихідних параметрів об'єкта дослідження за допомогою інтегрування змінних, які є математично вираженими щільностями імовірності.

Метод Монте-Карло полягає в багаторазовому виборі випадкової величини параметрів системи з наступним визначенням закону розподілу вихідних параметрів об'єкта дослідження.

Метод квазілінійних збурень полягає в поданні вихідних параметрів у вигляді ряду Тейлора з наступним визначенням закону розподілу ймовірностей вихідних параметрів.

Для визначення диференціального закону системи випадкових вихідних параметрів  $x_1(t), \dots, x_m(t)$  можна скористатися методикою, описаною в працях [1; 2].

Якщо припустити, що для отриманих рішень (1), відомий диференціальний закон розподілу ймовірностей  $f_0(x_1(t), \dots, x_m(t), \overline{\xi_{01}}, \dots, \overline{\xi_{0k}}, \tau_0, \tau)$  системи випадкових величин  $x_{01}, \dots, x_{0m}, \xi_{01}, \dots, \xi_{0k}$ , функція  $F_{0i}$  має кусково-безперервні часткові похідні за координатами  $x_i$ , рішення системи рівнянь (1)  $\varphi_i$  мають другі часткові похідні за  $x_i$  і  $t$  і, крім того, рішення мають перші похідні за  $\xi_i$ , то диференціальний закон розподілу системи випадкових величин  $x_1, \dots, x_m$ , визначається рівністю [1; 2; 3; 4]:

$$f(x_1, \dots, x_m, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau \right\} d\overline{\xi_1}, \dots, d\overline{\xi_{k'}}. \quad (6)$$

Якщо врахувати границі змін величин  $\bar{\zeta}_1, \dots, \bar{\zeta}_{k'}$ , то рівняння (6) можна переписати в такому вигляді:

$$f(x_1, \dots, x_{m'}, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'},$$

де  $\eta_j = \varphi_j[\tau_0, \tau, \varphi_\gamma(\tau, \tau_0, x_\sigma, \zeta_\nu), \zeta_\nu]$  при індексах  $j, \gamma, \sigma$ , що пробігають значення  $1, 2, \dots, m$ , а  $\nu$  пробігає значення  $1, 2, \dots, k'$ .

Для визначення закону розподілу перехідної функції об'єкта дослідження необхідно на його вхід продати стрибкоподібні впливи і визначити закон [1]:

$$f(h_1, \dots, h_{m'}, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Для визначення диференціального  $m'$ -мірного закону розподілу імпульсних функцій можна скористатися якобіаном перетворення  $I(f_h \rightarrow f_w)$  з урахуванням того, що  $w(t, \tau, X, Z, Q) = h'(t, \tau, X, Z, Q)$ .

Диференціальний закон розподілу передаточної функції амплітудних і фазочастотних характеристик визначаються при гармонійних впливах на об'єкт.

Тоді отримуємо закон розподілу передаточної функції об'єкта:

$$f(W_1, \dots, W_{m'}, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

закон розподілу амплітудно-частотної характеристики об'єкта:

$$f(A_1, \dots, A_{m'}, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

закон розподілу фазочастотної характеристики об'єкта:

$$f(\varphi_1, \dots, \varphi_{m'}, t, \tau) = \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\zeta}_{1\min}}^{\bar{\zeta}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}.$$

Таким чином, теоретично виявляється можливим достатньо точно визначити  $m'$ -мірні диференціальні закони розподілу вихідних параметрів і векторів-операторів. Однак виконати інтегрування у явному виді можна тільки тоді, коли щільність імовірності є простою аналітичною функцією випадкових параметрів. Зі зростанням кількості параметрів і складності аналітичних функцій застосування методу викликає істотні математичні труднощі [1].

**Використання методу статистичної лінеаризації.** Для складних об'єктів з нелінійностями при імовірнісному аналізі, для практичних задач іноді достатньо оцінювати тільки перші два моменти вихідних параметрів: математичне очікування і кореляційну функцію або дисперсію. Ці моменти дозволяють повністю визначити закон розподілу ймовірностей, який приблизно можна вважати нормальним.

Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта в узагальненій формі представляється у вигляді:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) x_\rho = F_l(X, Z, t, \tau) + \varphi_l(Z_l); \\ Z_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j; \quad l = 1, \dots, m \end{cases} \quad (7)$$

де  $a_i^l, c_j^l$  – постійні коефіцієнти;

$X\{x_1, \dots, x_m\}$  – вектор випадкових функцій параметра  $t$ , який визначає рух об'єкта;

$Z\{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$  – вектор збурень, який є випадковою функцією параметра  $t$ ;

$F_l$  – нелінійні функції, які припускають лінеаризацію відносно певного режиму руху об'єкта в межах робочих діапазонів величин або функцій;

$\varphi_l$  – нелінійні функції, які не припускають звичайної лінеаризації;

$M_{l\rho}$  – поліноми відносно оператора диференціювання зі змінними у часі коефіцієнтами;

$S_l$  – кількість параметрів, які визначають поведінку об'єкта;

$N_l$  – кількість діючих збурень.

Після відповідних перетворень утворюється лінійна система рівнянь для визначення математичного очікування випадкових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) m_{x\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_l) + K_0^l m_l; \\ m_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{x_i} + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l m_{\zeta_j} \end{cases} \quad (8)$$

й система рівнянь для визначення випадкових складових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho}(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q) x_\rho^0 = \sum_{\mu=1}^m \left[ \frac{\partial F_l}{\partial m_{x\mu}} \right]_0 x_\mu^0 + \sum_{j=1}^{N_l} \left[ \frac{\partial F_l}{\partial m_{\zeta_j}} \right]_0 \zeta_j^0 + K_1^l z_l^0; \\ z_l^0 = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^0 + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j^0, \end{cases} \quad (9)$$

де  $K_0^l$  і  $K_1^l$  – статистичні коефіцієнти посилення [2].

Проінтегрувавши системи рівнянь (8) і (9), наприклад методом послідовних наближень, визначимо математичне очікування, кореляційні функції і дисперсії вихідних параметрів.

Цей метод наближеного розв'язку застосовується тоді, коли метод гармонійної лінеаризації не дає бажаних результатів [1].

**Використанням методу гармонійної лінеаризації.** Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта подається у формі (7). Оскільки методика лінеаризації нелінійних систем зі змушеними коливаннями аналогічна методиці лінеаризації нелінійних систем, які працюють в автоколивальному режимі, то можна обмежитись викладенням метода лінеаризації систем з автоколиваннями.

Математичне очікування  $m_{x\rho}(t)$  і кореляційна функція  $K_{x\rho x_i}(t, S)$   $\rho = 1, \dots, m$ ) визначаються при представленні  $Zt(t)$  у вигляді:

$$Z_l(t) = Z_l^0(t) + Z_l^*(t) \quad l = 1, \dots, m \quad (10)$$

де  $Z_l^0$  – випадкова складова вихідного параметра, що повільно змінюється;  $(t) = Z \sin \Omega t$  – гармонічна складова з випадковою амплітудою  $Z$ .

Для обґрунтованого виконання процедури гармонічної лінеаризації робимо припущення, що вихідний параметр системи близький до гармонічного коливання. Тоді функцію  $\varphi_l(Z_l)$  можна представити у вигляді [5]:

$$\varphi_l(Z_l) = \varphi_l^0 + g Z_l^* + \frac{g'}{\Omega} \cdot \frac{d}{dt} Z_l^*,$$

де



$$\begin{aligned}\varphi_l^0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) d\Psi; \\ g &= \frac{1}{2Z} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) \sin \Psi d\Psi; \\ g' &= \frac{1}{\pi Z} \int_0^{2\pi} F(Z_l^0 + Z \sin \Psi, Z\Omega \cos \Psi) \cos \Psi d\Psi.\end{aligned}$$

Вирази  $\varphi_l^0$ ,  $g$ ,  $g'$  для конкретних нелінійностей можна взяти з [5].

Виконуючи відповідні підстановки і перетворення, отримуємо систему рівнянь для визначення математичного очікування вихідних параметрів:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{\rho l} \left( t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) m_{x\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_z) + \varphi_l^0(Z_l^0); \\ Z_l^0 = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{xi} + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l m_{\xi j} \end{cases} \quad (11)$$

а також систему рівнянь для визначення випадкових складових функцій:

$$\begin{aligned} \sum_{\rho=1}^m M_{\rho l} \left( t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_{\rho}^0 &= \sum_{\rho=1}^m \left[ \frac{\partial F_l}{\partial m_{x\rho}} \right] x_{\rho}^0 + \\ &+ \sum_{\rho=1}^m \left[ \frac{\partial F_l}{\partial m_{\xi j}} \right] \xi_{\rho j}^0 + g Z_l^* + \frac{g'}{\Omega} \cdot \frac{d}{dt} Z_l^*; \\ Z_l^* &= \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^0 + \sum_{j=1}^{N_l} C_j^l x_{\xi j}^0 \end{aligned} \quad (12)$$

Проінтегрувавши системи рівнянь (11) та (12), можна визначити математичне очікування і кореляційну функцію вихідних параметрів. Це один з найпростіших методів. Наявність в системах великих відхилень і значної (великої) нелінійностей перешкоджає безпосередньому використанню цього методу.

В деяких випадках гарні результати дає комбінація метода лінійних збурень з методом Монте-Карло. При цьому аналіз нелінійної частини потрібно виконувати методом Монте-Карло, а лінійної – методом квазілінійних збурень.

Розроблені імовірнісні підходи дозволяють оптимізувати об'єктний склад ГІС ВП.

**Оцінка впливу законів розподілу параметрів елементів на статистичні характеристики ГІС ВП.** Випадкова зміна режиму та умов роботи ГІС ВП, а отже зміна параметрів елементів, обумовлює випадкову зміну її параметрів як протягом часу протікання процесів, так і реалізації одного процесу до іншого. Випадковий характер зміни параметрів ГІС ВП необхідно враховувати при оптимізації процесу моніторингу бойових дій. Тому розглянуті попередньо методи визначення імовірнісних характеристик об'єкта є з цієї точки зору недостатньо ефективними, оскільки вони отримані в припущенні, що параметри не випадкові, тобто вони змінюються в часі за певним законом або є постійними.

Оцінку імовірнісних характеристик параметрів ГІС ВП з урахуванням випадковості параметрів елементів можна виконати або методами безпосереднього визначення характеристики, або методом імовірнісного усереднення [6].

Методи безпосереднього визначення імовірнісних характеристик параметрів шляхом не випадкових впливів або методом Монте-Карло є доволі трудомісткими і одержувані цими методами залежності характеристик процесу від характеристик впливів і параметрів системи не є наочними.

Більш наочним і менш трудомістким є метод імовірнісного усереднення, суть якого полягає в наступному. Спочатку викладеними попередньо методами визначаються імовірнісні характеристики ідеалізованої системи об'єкта, тобто системи або нелінійної стаціонарної, або простої лінійної нестационарної з детермінованими параметрами. Потім відповідним імовірнісним усередненням отриманих характеристик в діапазоні можливих значень непрямих впливів визначаються дійсні значення імовірнісних характеристик.

Припустимо, що всі випадкові зовнішні прямі і внутрішні впливи  $\xi_i(t), \dots, \xi_k(t)$  не залежать від випадкових непрямих внутрішніх впливів  $\zeta_i(t), \dots, \zeta_\mu(t)$  що майже завжди має місце (майже завжди виконується). Тоді випадковий процес  $x_\rho(t)$  ( $\rho = 1, \dots, m$ ) в об'єкті є функцією випадкових впливів  $\xi_i(t)$  ( $i = 1, \dots, k$ ),  $\zeta_j(t)$  ( $j = 1, \dots, \mu$ )

$$x_\rho(t) = \varphi_0[\xi_i(t), \zeta_j(t), \tau],$$

де  $\varphi_0$  – деяка нелінійна функція.

Якщо  $f_\xi(Z, t, \tau)$  і  $f_\zeta(\zeta_1, \dots, \zeta_\mu, t, \tau)$  – диференціальні закони розподілу систем випадкових величин відповідно  $\xi_i$  і  $\zeta_j$ , то математическое ожидание выходных координат объекта можна розрахувати за формулою:

$$m_{x_\rho}(t, \tau) = \int \dots k \dots \int \dots \mu \int_{-\infty}^{\infty} \varphi \times [\xi_i(t), \zeta_i(t), \tau] f_\zeta(\xi_i, t, \tau) f_\xi(\xi_j, t, \tau) d\xi_j d\zeta_i$$

$$(i = 1, \dots, k) \quad (j = 1, \dots, \mu).$$

Математичне очікування параметрів  $x_\rho$  при конкретних значеннях  $\bar{\xi}_i$  випадкових величин  $\xi_i$  отримаємо шляхом усереднення  $\zeta_i$ :

$$m_{x_\rho}(\bar{\xi}_i, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots (k) \dots \int \varphi[\zeta_i(t), \bar{\xi}_i(t), \tau] f_\zeta(\zeta_i, t, \tau) d\zeta_i.$$

Це математичне очікування порівняно просто знаходиться для лінійних і нелінійних стаціонарних і нестационарних безперервних систем, а також для порівняно простих дискретних систем.

Для одержання математичного очікування вихідних параметрів об'єкта  $x_\rho(t)$  з урахуванням випадковості параметрів елементів необхідно виконати подальше усереднення:

$$m_{x_\rho}(t, \tau) = \int \dots (\mu)_{-\infty}^{\infty} \dots \int m_{x_\rho}(\bar{\zeta}, t, \tau) f_\zeta(\zeta_j, t, \tau) d\zeta_j.$$

Кореляційна функція і дисперсія вихідних параметрів знаходяться за аналогічною методикою.

Основною перевагою метода імовірнісного усереднення є незалежність урахування випадковості параметрів елементів від прямих випадкових впливів. При прямому методі урахування випадковості параметрів зазначена залежність зберігається, що спричинює істотні обчислювальні складності.

Таким чином, виявляється можливість визначити імовірнісні характеристики об'єкта, що включає стаціонарні і нестационарні, лінійні і нелінійні системи, точно і наближено з використанням методу статистичних проб і методу невинуватих впливів, а також методу імовірнісного усереднення.

У результаті наближених розв'язків з використанням лінеаризованих рівнянь і операторів одержуються наближені імовірнісні характеристики вихідних параметрів ГІС ВП, що визначають її стан, що дозволяє визначити оптимальну структуру ГІС ВП.

**Висновки.** Проведений аналіз засвідчив необхідність розробки методів і алгоритмів, які б дозволяли створити оптимальну структуру ГІС ВП на основі створення математичної функціональної статистичної моделі. Визначені напрямки дослідження на основі ймовірнісних підходів.

Розроблені алгоритми та супутня актуальна інформація в майбутньому можуть стати ядром оптимізаційних процесів і їх доцільно залучити до банку програмного забезпечення ГІС ВП. Вони дозволяють прискорити процес оптимізації за рахунок використання ймовірнісних підходів, можуть стати в нагоді при створення нового програмного забезпечення, для проведення оптимізації впровадження нових підсистем ГІС ВП, реалізації функцій їх взає-

модії та прийняття обґрунтованих рішень щодо їх впровадження. Надалі наукові дослідження будуть спрямовані на удосконалення існуючих підходів та розробку нового математичного апарату щодо синтезу організаційно-функціональних структур ГІС ВП.

### Список використаних джерел

1. Зацерковний, В. І., Оберемок, Н. В., & Бондарь, Ю. С. (2016). Оптимізація геоінформаційних систем для задач моніторингу акустичного забруднення. *Наукоємні технології*, 4(32), 425–433.
2. Kazakov, I. E., & Dostupov, B. G. (1962). *Statisticheskaya dinamika nelineynykh avtomaticheskikh sistem [Statistical dynamics of nonlinear automatic systems]*. Fizmatgiz.
3. Кушлик-Дивульська, О. І., Поліщук, Н. В., Орел, Б. П., & Штабальук, П. І. (2014). *Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник*. НТУУ «КПІ».
4. Штіфзон, О. Й., & Новіков, П. В. (2021). *Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
5. Popov, E. P., & Paltov, I. P. (1960). *Priblizhennyye metody issledovaniia nelineynykh avtomaticheskikh sistem [Approximate methods for studying nonlinear automatic systems]*.
6. Livshits, N. A., & Pugachev, V. N. (1963). *Veroyatnostnyi analiz sistem avtomaticheskogo upravleniia [Probabilistic analysis of automatic control systems]* (Vols. 1–2). Sovetskoe Radio.

### References

1. Zatserkovnyi, V. I., Oberemok, N. V., & Bondar, Yu. S. (2016). Optymizatsiia heoinformatsiynykh system dlia zadach monitorynhu akustychnoho zabrudnennia [Optimization of geographic information systems for acoustic pollution monitoring tasks.] *Naukoiemni tekhnolohii – Science-Intensive Technologies*, 4(32), 425–433.
2. Kazakov, I. E., & Dostupov, B. G. (1962). *Statistical dynamics of nonlinear automatic systems*. Fizmatgiz.
3. Kushlyk-Dyvulska, O. I., Polishchuk, N. V., Orel, B. P., & Shtabaliuk, P. I. (2014). *Teoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics]*. NTUU CKPI.
4. Shtifzon, O. Y., & Novikov, P. V. (2021). *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia. Neliniini ta dyskretni systemy [Theory of automatic control. Nonlinear and discrete systems]*. Igor Sikorsky KPI.
5. Popov, E. P., & Paltov, I. P. (1960). *Approximate methods for studying nonlinear automatic systems*.
6. Livshits, N. A., & Pugachev, V. N. (1963). *Probabilistic analysis of automatic control systems* (Vols. 1–2). Sovetskoe Radio.

Дата першого надходження статті до видання: 18.09.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 03.10.2025

UDC 681.518.3:528

### Mykola Bialyi<sup>1</sup>, Igor Pampukha<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Adjunct, Scientific and Organizational Department

Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [nikolai.bialiy@gmail.com](mailto:nikolai.bialiy@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0006-9487-1502>

<sup>2</sup> PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Center

Military Institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [igor.pampukha@knu.ua](mailto:igor.pampukha@knu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4807-3984>

## ANALYSIS OF APPROACHES TO FINDING THE OPTIMAL STRUCTURE OF A MILITARY-ORIENTED GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

A military-oriented Geographic Information System (GIS-M) is a typical dynamic and complex organizational system. The available GIS tools facilitate the effective preparation, processing, and visualization of spatial data, allowing the integration of various data sources and the analysis of spatial relationships between different factors. At the same time, GIS-M must remain flexible to adapt to constantly changing conditions and to improve existing systems in order to meet specific military needs. This can help identify optimal management strategies through modeling the interactions between troops and decision-makers (DMs).

The task of optimizing GIS belongs to the class of problems associated with the optimization of complex automated systems and is based on both classical and modern mathematical methods: variational calculus, statistical decision theory, game theory, operations research, information theory, probability theory, Pontryagin's maximum principle, Bellman's dynamic programming method, and others. It is a complex, non-trivial task that requires considering numerous characteristics of the battlefield, integrating with game theory, multi-criteria decision-making models, as well as the development and refinement of specialized algorithms. The paper presents the results of developing approaches to GIS-M optimization. Proposed approaches to optimization are outlined.

**Keywords:** geographic information system (GIS), geospatial data, military geographic information systems (GIS-M).

Fig.: 1. References: 6.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-286-293](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-286-293)

УДК 004.9+004.02

**Олексій Іванович Соколов<sup>1</sup>, Олег Олексійович Соколов<sup>2</sup>,  
Оксана Сергіївна Жураковська<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>архітектор OpenEdge, Zelis (Даллас, США)E-mail: [Lechat.sokolov@gmail.com](mailto:Lechat.sokolov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5173-5561>. ResearcherID: PDX-7190-2025<sup>2</sup>.NET Developer, Приватний підприємець (Кордоба, Іспанія)E-mail: [alex.falconson@gmail.com](mailto:alex.falconson@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7330-0593>. ResearcherID: PDX-7252-2025<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" (Київ, Україна)

E-mail: [o.zhurakovska@kpi.ua](mailto:o.zhurakovska@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2804-5556>

ResearcherID: K-3412-2017. Scopus Author ID: 57783309900

## АЛГОРИТМ РОЗПОДІЛУ ДОПОМІЖНИХ ВИРОБНИЧИХ ВИТРАТ ДЛЯ ФІНАНСОВИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

*Метод обліку витрат Direct-Costing, який використовується в сучасних фінансових інформаційних системах та ERP-системах, потребує наявності ефективного алгоритму розподілу допоміжних виробничих витрат. Розроблено алгоритм CostAlloc розподілу допоміжних виробничих витрат, який дозволяє здійснювати розподіл в режимі реального часу для великих розмірностей, що підвищує ефективність управлінських рішень. На основі аналізу властивостей матриці розподілу запропоновано підхід, який лежить в основі розробленого алгоритму, і який в порівнянні з ітераційним алгоритмом розподілу, що застосовується на практиці, дозволяє суттєво зменшити кількість ітерацій для отримання результуючого розподілу.*

**Ключові слова:** фінансова інформаційна система; ERP-система; метод обліку витрат; Direct-Costing; алгоритм розподілу допоміжних виробничих витрат.

Табл.: 2. Рис.: 3. Бібл.: 18.

**Актуальність теми дослідження.** Робота сучасних промислових підприємств в умовах жорсткої конкуренції, зовнішніх викликів та складної ситуації в економіці вимагає наявності ефективної та прозорої системи управлінського обліку. Для цього необхідно вирішити проблему управління витратами, спростити та підвищити ефективність управлінських рішень. Одним з важливих чинників, що дозволяють вирішувати виявлені проблеми, є спрощення процесу розподілу допоміжних виробничих витрат та забезпечення його реалізації в режимі реального часу. Роботу присвячено актуальному питанню розробки алгоритму розподілу допоміжних виробничих витрат, який дозволить здійснювати розподіл у режимі реального часу для великих розмірностей, що підвищить ефективність управлінських рішень.

**Постановка проблеми.** Метод обліку витрат Direct-Costing, який використовується в сучасних фінансових інформаційних системах та ERP-системах, потребує наявності ефективного алгоритму розподілу допоміжних виробничих витрат, який при застосуванні до задач великих розмірностей забезпечить здійснення розподілу в режимі реального часу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метод обліку витрат Direct-Costing використовується як в українському, так і світовому управлінському обліку, та знаходить застосування в сучасних ERP-системах. Різні аспекти його застосування досліджені в роботах [1–11]. Метод Direct-Costing дозволяє оцінити, наскільки ефективним є виробничий процес, не враховуючи постійні витрати, оскільки вони є незмінними для деякого короткострокового періоду [12]. Метод передбачає виділення змінних витрат для калькуляції собівартості продукції. Метод Direct-Costing дозволяє швидко оцінити зміни в обсягах виробництва і має важливе застосування в ухваленні управлінських рішень, оскільки дозволяє ухвалювати оперативні управлінські рішення щодо обсягів та структури випуску продукції, ціноутворення тощо.

Сучасні ERP-системи, у яких для обліку витрат використовується метод Direct-Costing, інтегрують рішення для процесів виробництва, запасів, продажів, фінансів, управлінського обліку тощо [13]. Прикладами таких систем є SAP S/4HANA, SAP Business One, BAS ERP, Oracle EPM Cloud, Sage 300 тощо [14–16].

Принцип розподілу витрат у методі Direct-Costing, на відміну від традиційного повного калькулювання, передбачає включення в собівартість продукції лише змінних витрат. Однак єдиного алгоритму розподілу витрат немає, є тільки загальний підхід до розподілу, який застосовується на практиці.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Найчастіше при розподілі витрат виникає необхідність розподілу допоміжних виробничих витрат на основне виробництво. Основна проблема, з якою стикаються бухгалтери при такому розподілі, виникає, коли допоміжне виробництво відносить витрати не лише на основне виробництво, але присутній також взаєморозподіл витрат між допоміжними підрозділами. В цьому випадку на практиці використовують ітераційний алгоритм, де на кожній ітерації здійснюють поступовий розподіл допоміжних витрат у відповідності із визначеними пропорціями розподілу. У практичних застосуваннях для реальних підприємств, де кількість виробничих підрозділів перевищує 10, а кількість допоміжних – перевищує 20, такий розрахунок може вимагати в деяких випадках більше 50 ітерацій, тривалих розрахунків та надмірного споживання потужності сервера. Крім того, у випадку виявлення помилок обліку, здійснюється коригування та повторний розрахунок розподілу допоміжних витрат, що суттєво підвищує час розрахунків. Тому розробка алгоритму розподілу допоміжних виробничих витрат, який дозволить здійснювати розподіл допоміжних витрат у режимі реального часу для задач великих розмірностей, залишається актуальним завданням.

**Метою дослідження** є розробка алгоритму розподілу допоміжних виробничих витрат для використання в обліку витрат методом Direct-Costing, що забезпечить можливість здійснювати розподіл для задач великих розмірностей за прийнятний час.

**Виклад основного матеріалу.** Наведемо загальний підхід до розподілу витрат, який використовується на практиці.

Введемо позначення:

$k$  – кількість виробничих підрозділів,

$m$  – кількість допоміжних підрозділів,

$n$  – загальна кількість підрозділів ( $n = k + m$ ),

$M$  – нормалізована матриця розподілу допоміжних витрат розмірності  $m \times n$ , на практиці отримується на основі бази для розподілу витрат допоміжних підрозділів після виконання її нормалізації,

$V = [B | D]$  – вектор загальних витрат, де  $B$  – вектор витрат виробничих підрозділів,  $D$  – вектор витрат допоміжних підрозділів,

$N = \begin{bmatrix} I & O \\ M \end{bmatrix}$  – загальна матриця розподілу витрат, є блочною нормалізованою матрицею розмірності  $n \times n$ ,  $I$  – одинична матриця розмірності  $k \times k$ ,  $O$  – нульова матриця розмірності  $k \times m$ .

На практиці розподіл допоміжних витрат здійснюється ітераційно, відповідно до співвідношення:

$$V_{i+1} = V_i N, \quad (1)$$

де  $V_0$  – початковий вектор нерозподілених витрат,  $V_i$  – вектор витрат після виконання  $i$ -ї ітерації розподілу витрат.

Враховуючи, що співвідношення (1) можна представити у вигляді:

$$V_i = V_0 N^i, \quad (2)$$

де  $V_0$  – початковий вектор нерозподілених витрат, а також враховуючи, що прискорення обчислень (2) можливе за рахунок зменшення кількості ітерацій завдяки використанню

операції піднесення матриці до квадрата [17], будемо використовувати для обчислення розподілу допоміжних витрат таке співвідношення:

$$V_i = V_0 N^{2^i}. \quad (3)$$

Коректність використання співвідношення (3) для обчислення перерозподілу допоміжних витрат обумовлене тим, що матриця  $N$  є стохастичною і за теоремою Перрона-Фробеніуса [18] гарантовано збігається до стаціонарного розподілу із будь-якою точністю.

Наведемо запропонований алгоритм розподілу допоміжних виробничих витрат.

*Алгоритм CostAlloc розподілу допоміжних виробничих витрат.*

Перед виконанням алгоритму визначити необхідну точність процесу розподілу  $\varepsilon$ .

Крок 1. Сформувати матрицю перетворення  $N$ .

1.1. Для цього на основі бази для розподілу витрат допоміжних підрозділів сформувати матрицю  $M$  та виконати її нормалізацію діленням кожного елемента матриці на суму елементів у відповідному рядку.

1.2. На основі одиничної, нульової матриць та матриці  $M$  сформувати матрицю перетворення виду  $N = \begin{bmatrix} I & O \\ M \end{bmatrix}$ .

Крок 2. Виконувати ітеративні перетворення

$$N_{i+1} = N_i^2, \quad (4)$$

поки коефіцієнти розподілу для допоміжних підрозділів не досягнуть близьких до нульових значень із заданою точністю  $\varepsilon$ . Отримано результуючу матрицю розподілу витрат  $N'$ .

Крок 3. Обчислити вектор розподілених витрат  $V = V_0 N'$ , виконати заокруглення.

### Результати дослідження.

Розглянемо приклад застосування алгоритму CostAlloc.

Для початкових даних, заданих у табл. 1, та початкового вектора  $V_0 = (15000, 7000, 9000, 7600, 8300, 5600)$  виконано розподіл допоміжних витрат за традиційною процедурою, результату досягнуто після виконання 13 ітерацій. Вектор перерозподілених витрат становить  $V = (21595,99; 13557,47; 17346,54; 0,00; 0,00; 0,00)$ .

Таблиця 1 – Вхідні дані для розподілу

| Підрозділи, звідки здійснено розподіл | Підрозділи, на які здійснюється розподіл |          |          |           |          |           | Витрати  |
|---------------------------------------|------------------------------------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                                       | Цех 1                                    | Цех 2    | Цех 3    | Транспорт | Котельня | Ремонтний |          |
| Цех 1                                 | 15000,00                                 | 0,00     | 0,00     | 0,00      | 0,00     | 0,00      | 15000,00 |
| Цех 2                                 | 0,00                                     | 7000,00  | 0,00     | 0,00      | 0,00     | 0,00      | 7000,00  |
| Цех 3                                 | 0,00                                     | 0,00     | 9000,00  | 0,00      | 0,00     | 0,00      | 9000,00  |
| Транспорт.                            | 912,00                                   | 1292,00  | 1672,00  | 0,00      | 2356,00  | 1368,00   | 7600,00  |
| Котельня                              | 1909,00                                  | 1743,00  | 2241,00  | 1577,00   | 0,00     | 830,00    | 8300,00  |
| Ремонтний                             | 1624,00                                  | 1400,00  | 1736,00  | 728,00    | 112,00   | 0,00      | 5600,00  |
| Загалом                               | 19445,00                                 | 11435,00 | 14649,00 | 2305,00   | 2468,00  | 2198,00   | 52500,00 |

Джерело: розроблено авторами.

Наведемо результат застосування запропонованого алгоритму CostAlloc розподілу допоміжних виробничих витрат для заданих у табл. 1 початкових умов. Нормалізовану матрицю перетворення  $N$  наведено в табл. 2.

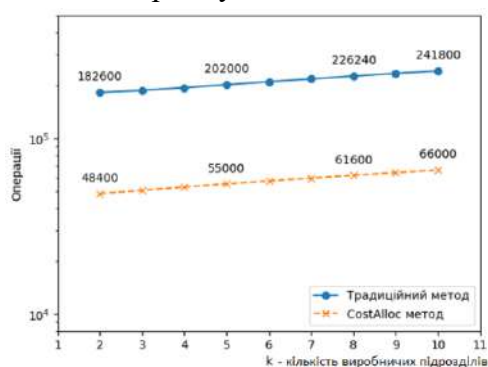
Вектор перерозподілених витрат  $V = (21595,99; 13557,47; 17346,54; 0,00; 0,00; 0,00)$  у випадку застосування алгоритму CostAlloc отримано на 5-й ітерації.

Таблиця 2 – Нормалізована матриця перетворення

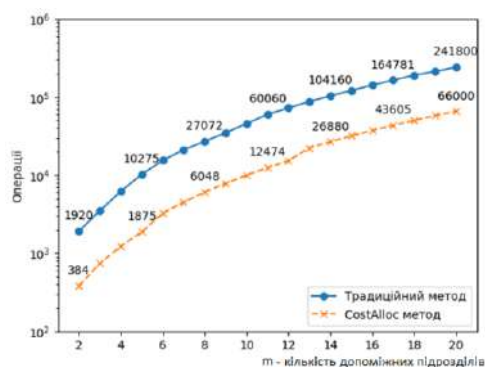
| Підрозділи, звідки здійснено розподіл | Підрозділи, на які здійснюється розподіл |       |       |           |          |           | Разом |
|---------------------------------------|------------------------------------------|-------|-------|-----------|----------|-----------|-------|
|                                       | Цех 1                                    | Цех 2 | Цех 3 | Транспорт | Котельня | Ремонтний |       |
| Цех 1                                 | 1                                        | 0     | 0     | 0         | 0        | 0         | 1     |
| Цех 2                                 | 0                                        | 1     | 0     | 0         | 0        | 0         | 1     |
| Цех 3                                 | 0                                        | 0     | 1     | 0         | 0        | 0         | 1     |
| Транспорт.                            | 0,12                                     | 0,17  | 0,22  | 0         | 0,31     | 0,18      | 1     |
| Котельня                              | 0,23                                     | 0,21  | 0,27  | 0,19      | 0        | 0,1       | 1     |
| Ремонтний                             | 0,29                                     | 0,25  | 0,31  | 0,13      | 0,02     | 0         | 1     |

Джерело: розроблено авторами.

Наведемо дослідження ефективності роботи алгоритму CostAlloc у порівнянні із традиційним алгоритмом. Результати дослідження залежності кількості необхідних операцій множення від кількості виробничих підрозділів та кількості допоміжних підрозділів наведено на рис. 1, а та 1, б відповідно, для традиційного алгоритму розподілу та для розробленого алгоритму CostAlloc.



а



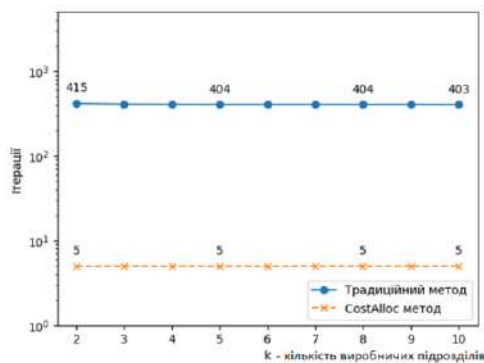
б

Рис. 1. Залежність кількості необхідних операцій множення від кількості підрозділів: а – виробничих; б – допоміжних

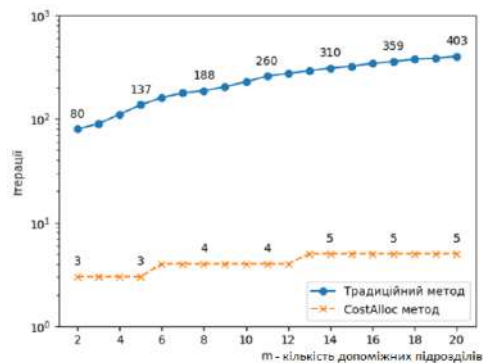
Джерело: розроблено авторами.

Залежності, наведені на рис. 1, а, встановлені для фіксованого значення кількості допоміжних підрозділів  $m = 20$ , а наведені на рис. 1, б – для фіксованого значення кількості виробничих підрозділів  $k = 10$ .

Результати дослідження залежності кількості ітерацій алгоритму від кількості виробничих підрозділів та кількості допоміжних підрозділів наведено на рис. 2, а та 2, б відповідно, для традиційного алгоритму розподілу та для розробленого алгоритму CostAlloc.



а



б

Рис. 2. Залежність кількості ітерацій від кількості підрозділів:

а – виробничих; б – допоміжних

Джерело: розроблено авторами.

Залежності, наведені на рис. 2, *а*, встановлені для фіксованого значення кількості допоміжних підрозділів  $m = 20$ , а наведені на рис. 2, *б* – для фіксованого значення кількості виробничих підрозділів  $k = 10$ .

Результати дослідження залежності часу роботи традиційного та розробленого алгоритму CostAlloc від кількості виробничих підрозділів та кількості допоміжних підрозділів наведено на рис. 3, *а* та 3, *б* відповідно.

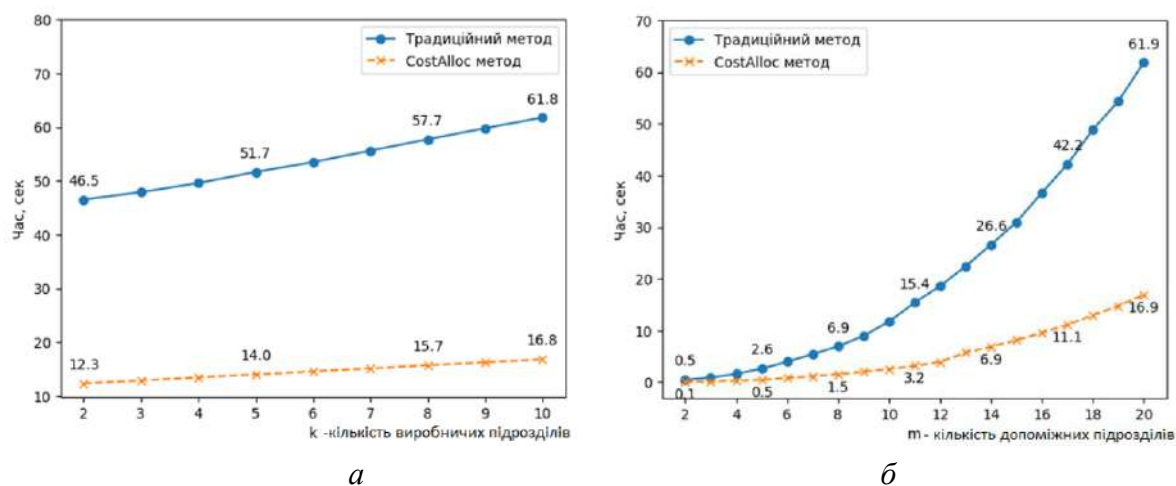


Рис. 3. Залежність часу роботи алгоритму від кількості підрозділів:  
а – виробничих; б – допоміжних

Джерело: розроблено авторами.

Залежності, наведені на рис. 3, *а*, встановлені для фіксованого значення кількості допоміжних підрозділів  $m = 20$ , а наведені на рис. 3, *б* – для фіксованого значення кількості виробничих підрозділів  $k = 10$ .

Проведені дослідження залежності необхідної кількості операцій множення, кількості ітерацій, необхідних для отримання результатів із заданою точністю, та часу роботи алгоритмів від кількості підрозділів показали, що ці параметри мають невелике зростання при збільшенні кількості виробничих підрозділів, і помітно зростають при збільшенні кількості допоміжних підрозділів. Так, зростання необхідної кількості операцій множення при збільшенні кількості виробничих підрозділів до 10 становить 32,4 % для традиційного алгоритму і 36,4 % для алгоритму CostAlloc. У випадку збільшення кількості допоміжних підрозділів до 10 таке зростання складає 1300 % для традиційного алгоритму і 1475 % для алгоритму CostAlloc, а при збільшенні кількості допоміжних підрозділів з 10 до 20 – 793 та 991 % відповідно. Це можна пояснити ускладненням розподілу, коли допоміжні підрозділи надають послуги одне одному, що впливає на щільність матриці  $M$ . При цьому для алгоритму CostAlloc кількість операцій множення в середньому залишається меншою у 3-5 разів, ніж для традиційного алгоритму.

В усіх випадках значення відповідних параметрів запропонованого алгоритму CostAlloc в рази, а іноді на порядок кращі, ніж у традиційного алгоритму. Так, для розмірності задачі  $k = 10$ ,  $m = 20$  (кількість виробничих та допоміжних підрозділів відповідно) результат із заданою точністю можна отримати приблизно за 400 ітерацій традиційним алгоритмом і за 5 ітерацій запропонованим алгоритмом CostAlloc. При цьому час роботи традиційного алгоритму становить 61,9 с, а алгоритму CostAlloc – 16,9 с.

**Висновки.** Результати проведеного дослідження підтверджують високу ефективність розробленого алгоритму CostAlloc з погляду кількості ітерацій, необхідних для отримання розв'язку із заданою точністю, а також часу роботи. У порівнянні з традицій-



ним алгоритмом він має вищу практичну значимість. Він може бути застосований до обчислення розподілу допоміжних виробничих витрат у фінансових інформаційних системах або ERP-системах для задач великих розмірностей у режимі реального часу, що сприяє отриманню оперативних управлінських рішень та підвищує загальну ефективність управління підприємствами.

Розроблений алгоритм CostAlloc був впроваджений в системі обліку та планування одного з підприємств України.

Перспективи подальших досліджень передбачають порівняння запропонованого алгоритму із прямими методами розв'язання систем лінійних рівнянь (наприклад, методом Гаусса або LU-розкладом), а також пошук інших підходів до розподілу допоміжних витрат при застосуванні метода Direct-Costing, що відповідають вимогам стандартів та податкового законодавства України.

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

Під час написання цього матеріалу автори використовували DeepL для перекладу анотації англійською мовою. Після використання цього інструменту автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

### **Список використаних джерел**

1. Berkau, C. (2020). *Management Accounting*. München: UKV Verlag.
2. Bhimani, A., Horngren, C., Datar, S., & Rajan, M.V. (2015). *Management and Cost Accounting*. Harlow: PEARSON.
3. Djumanov, S.A. (2025). Issues Of Adapting The "Direct-Costing" Method For Considering Product Costs To The Practice Of The Country. *Diversity Research: Journal of Analysis and Trends*, 3(05), 22-26. <https://academiaone.org/index.php/2/article/view/1207>.
4. Manuho, P., Saerang, D. P. E., & Pusung, R. J. (2023). Analysis of Production Cost Calculations using the Direct Costing Method at PT Fortuna Inti Alam. *Formosa Journal of Applied Sciences*, 2(10), 2249–2262. <https://doi.org/10.55927/fjas.v2i10.6469>.
5. Zorina, O.A. (2022). Direct costing and absorption costing systems: comparative characteristics. *Market relations development in Ukraine*, 9(256)2022, 102, 16–20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7441722>.
6. Pererva, P., Kobielieva, T., Keršys, R., Nagy, S., Kosenko, O., Tkachova, N., & та ін. (2025). Development of methods for forming the cost of production and assessment of its impact on the efficiency of an industrial enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (4 (83)), 26–33. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331215>.
7. Alexopoulou, S., Balios, D., & Kounadeas, T. (2024). Essential Factors When Designing a Cost Accounting System in Greek Manufacturing Entities. *Journal of Risk and Financial Management*, 17(8), 366. <https://doi.org/10.3390/jrfm17080366>.
8. Yu, K., He, Q., & Chen, P. (2025). Enterprise cost accounting and control based on job costing method. *Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing*, 127a, 6603–6619. <https://doi.org/10.61091/jcmcc127a-366>.
9. Vărzaru, A.A. (2022). Assessing Digital Transformation of Cost Accounting Tools in Healthcare. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15572. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315572>.
10. Gutiérrez, M. (2021). Making better decisions by applying mathematical optimization to cost accounting: An advanced approach to multi-level contribution margin accounting. *Heliyon*, 7(2)2021, e06096. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06096>.
11. Amirgaliyeva, A., Kaliyeva, Y., Kadyrova, K., Nurpeisova, N., Bolshekbayeva, K., & Beisekova, P. (2025). Identifying areas for improving management accounting tools in the food industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(13(133)), 27–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322429>.

12. Shevtsiv, L. (2024). Cost formation by the "direct-costing" method: foreign and domestic experience. *Journal of Science. Lyon*, 50, 3–10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10609608>
13. Vivanco-Ruidías, G., & Hernández-Pajares, J. (2025). Perceptions of the importance of cost systems within peruvian companies. *Costos y Gestión*, 35, 1–28. <https://doi.org/10.56563/costosygestion.108.e4>.
14. Shepeliuk, V. (2025). Digital transformation of accounting and analytical processes in Ukraine: trends, challenges, and security imperatives (2020–2025). *Economics, Finance and Management Review*, 3(23), 58–66. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2025-3-58-66>.
15. Макаренко, Т. І., & Сорока, А. М. (2025). Оцінка ефективності методів планування ресурсів підприємств галузі телекомунікацій. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*, 1(48), 24–43. <https://doi.org/10.31673/2415-8089.2025.012443>.
16. Katuu, S. (2021). Trends in the Enterprise Resource Planning Market Landscape. *Journal of information and organizational sciences*, 45, 55–75. <https://doi.org/10.31341/jios.45.1.4>.
17. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2002). *Introduction to algorithms. Second edition*. Cambridge: The MIT Press.
18. Levin, D.A. (2017). *Markov Chains and Mixing Times: Second Edition*. MSC.

### References

1. Berkau, C. (2020). *Management Accounting*. München: UKV Verlag.
2. Bhimani, A., Horngren, C., Datar, S., Rajan, M. V. (2015). *Management and Cost Accounting*. Harlow: PEARSON.
3. Djumanov, S. A. (2025). Issues Of Adapting The “Direct-Costing” Method For Considering Product Costs To The Practice Of The Country. *Diversity Research: Journal of Analysis and Trends*, 3(05), 22–26. <https://academiaone.org/index.php/2/article/view/1207>
4. Manuho, P., Saerang, D. P. E., Pusung, R. J. (2023). Analysis of Production Cost Calculations using the Direct Costing Method at PT Fortuna Inti Alam. *Formosa Journal of Applied Sciences*, 2(10), 2249–2262. <https://doi.org/10.55927/fjas.v2i10.6469>.
5. Zorina, O.A. (2022). Direct costing and absorption costing systems: comparative characteristics. *Market relations development in Ukraine*, 9(256)2022, 102, 16–20. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7441722>.
6. Pererva, P., Kobielieva, T., Keršys, R., Nagy, S., Kosenko, O., Tkachova, N., et al. (2025). Development of methods for forming the cost of production and assessment of its impact on the efficiency of an industrial enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(4(83)), 26–33. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331215>.
7. Alexopoulou, S., Balios, D., Kounadeas, T. (2024). Essential Factors When Designing a Cost Accounting System in Greek Manufacturing Entities. *Journal of Risk and Financial Management*, 17(8), 366. <https://doi.org/10.3390/jrfm17080366>.
8. Yu, K., He, Q., Chen, P. (2025). Enterprise cost accounting and control based on job costing method. *Journal of Combinatorial Mathematics and Combinatorial Computing*, 127a, 6603–6619. <https://doi.org/10.61091/jcmcc127a-366>.
9. Vărzaru, A.A. (2022). Assessing Digital Transformation of Cost Accounting Tools in Healthcare. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 15572. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315572>.
10. Gutiérrez, M. (2021). Making better decisions by applying mathematical optimization to cost accounting: An advanced approach to multi-level contribution margin accounting. *Heliyon*, 7(2)2021, e06096. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06096>.
11. Amirgaliyeva, A., Kaliyeva, Y., Kadyrova, K., Nurpeisova, N., Bolshekbayeva, K., Beisekova, P. (2025). Identifying areas for improving management accounting tools in the food industry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(13(133)), 27–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322429>.
12. Shevtsiv, L. (2024). Cost formation by the "direct-costing" method: foreign and domestic experience. *Journal of Science. Lyon*, 50, 3–10. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10609608>.
13. Vivanco-Ruidías, G., Hernández-Pajares, J. (2025). Perceptions of the importance of cost systems within peruvian companies. *Costos y Gestión*, 35, 1–28. <https://doi.org/10.56563/costosygestion.108.e4>.

14. Shepeliuk, V. (2025). Digital transformation of accounting and analytical processes in Ukraine: trends, challenges, and security imperatives (2020–2025). *Economics, Finance and Management Review*, 3(23), 58–66. <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2025-3-58-66>.
15. Makarenko, T. I., Soroka, A. M. (2025). Otsinka efektyvnosti metodiv planuvannia resursiv pidpriemstv haluzi telekomunikatsii [Evaluation of the effectiveness of enterprise resource planning methods in the telecommunications sector]. *Ekonomika. Menedzhment. Biznes – Economics. Management. Business*, 1(48), 24–43. <https://doi.org/10.31673/2415-8089.2025.012443>.
16. Katuu, S. (2021). Trends in the Enterprise Resource Planning Market Landscape. *Journal of information and organizational sciences*, 45, 55–75. <https://doi.org/10.31341/jios.45.1.4>.
17. Cormen, T.H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L., Stein, C. (2002). *Introduction to algorithms. Second edition*. Cambridge: The MIT Press.
18. Levin, D.A. (2017). *Markov Chains and Mixing Times: Second Edition*. MSC.

Дата першого надходження статті до видання: 21.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.12.2025

UDC 004.9+004.02

**Oleksii Sokolov<sup>1</sup>, Oleh Sokolov<sup>2</sup>, Oksana Zhurakovska<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>OpenEdge architect, Zelis (Dallas, USA)

E-mail: [Lechat.sokolov@gmail.com](mailto:Lechat.sokolov@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5173-5561>. ResearcherID: [PDX-7190-2025](https://orcid.org/0009-0009-5173-5561)

<sup>2</sup>.NET Developer, Sole proprietor (Cordoba, Spain)

E-mail: [alex.falconson@gmail.com](mailto:alex.falconson@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7330-0593>. ResearcherID: [PDX-7252-2025](https://orcid.org/0009-0009-7330-0593)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Systems and Technologies  
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [o.zhurakovska@kpi.ua](mailto:o.zhurakovska@kpi.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2804-5556>

ResearcherID: [K-3412-2017](https://orcid.org/0000-0002-2804-5556). Scopus Author ID: [57783309900](https://orcid.org/0000-0002-2804-5556)

## ALGORITHM FOR ALLOCATING AUXILIARY PRODUCTION COSTS FOR FINANCE INFORMATION SYSTEMS

*The need to improve the effectiveness of management decisions in the context of challenges and competition requires modern enterprises to apply information technologies and progressive management methods. The Direct-Costing method, which is used in modern financial information systems and ERP systems, requires an effective algorithm for allocating auxiliary production costs.*

*The principle of production cost allocation in the Direct-Costing method is a general approach to allocation that is used in practice. The aim of the study is to develop an algorithm for the allocation of auxiliary production costs, which will enable the allocation of big-size tasks within an acceptable time frame.*

*The properties of the general matrix of production cost allocation are analyzed, and conditions for reducing the number of iterations in the iterative allocation of overhead costs are formulated. The CostAlloc algorithm for allocating auxiliary production costs has been developed. The effectiveness of the CostAlloc algorithm was studied in comparison with the traditional iterative allocation algorithm. It was shown that in all analyzed cases, the parameters of the proposed CostAlloc algorithm are several times, and sometimes an order of magnitude better than the traditional allocation algorithm.*

*The results of the research confirm the high efficiency of the developed CostAlloc algorithm in terms of the number of iterations required to obtain a solution with a given accuracy, as well as the operating time. The CostAlloc algorithm can be applied to calculate the allocation of auxiliary production costs in financial information systems or ERP systems for big-dimensional tasks in real time, which facilitates operational management decisions and increases the overall efficiency of enterprise management.*

**Keywords:** finance information system; ERP system; cost accounting method; Direct-Costing; algorithm for allocating auxiliary production costs.

Table: 2. Fig.: 3. References: 18.

## РОЗДІЛ III. ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-294-302](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-294-302)

УДК 621.357

**Олександр Юрійович Бровін<sup>1</sup>, Юлія Іванівна Коваленко<sup>2</sup>, Сергій Анатолійович Лещенко<sup>3</sup>,  
Світлана Германівна Дерібо<sup>4</sup>, Наталя Анатоліївна Чорна<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технічної електрохімії

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

E-mail: [oleksandr.brovin@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.brovin@khpi.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>. ResearcherID: NHM-4978-2022  
SCOPUS Author ID: 57220217768

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

E-mail: [yuliia.kovalenko@khpi.edu.ua](mailto:yuliia.kovalenko@khpi.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7523-8545>. ResearcherID: PDW-4006-2025  
SCOPUS Author ID: 59295257300

<sup>3</sup>кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технічної електрохімії

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

E-mail: [serhii.leshchenko@khpi.edu.ua](mailto:serhii.leshchenko@khpi.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2918-9575>. ResearcherID: PDW-7196-2025  
SCOPUS Author ID: 8975907100

<sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної електрохімії

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

E-mail: [svitlana.deribo@khpi.edu.ua](mailto:svitlana.deribo@khpi.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>. ResearcherID: PCT-8815-2025  
SCOPUS Author ID: 6507471701

<sup>5</sup>кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу термогазодинаміки енергетичних машин

Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України

E-mail: [nataliyachernaya7@gmail.com](mailto:nataliyachernaya7@gmail.com). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9161-0298>. ResearcherID: T-8667-2018  
SCOPUS Author ID: 57190837440

### ВПЛИВ СКЛАДУ АКТИВНОГО ШАРУ ОКСИДНОГО КОБАЛЬТ- ТИТАНОВОГО АНОДА НА КІНЕТИКУ РЕАКЦІЇ ВИДІЛЕННЯ ХЛОРУ

Для електролізу розчинів хлоридів пропонується металоксидний анод з активним каталітичним шаром із суміші оксиду кобальту ( $\text{Co}_3\text{O}_4$ ) та оксиду титану ( $\text{TiO}_2$ ), нанесених на проміжний шар діоксиду рутенію ( $\text{RuO}_2$ ) на титановій основі. Основна мета - дослідження впливу складу активного шару на кінетику реакції виділення хлору та визначення природи поляризації в концентрованих розчинах  $\text{NaCl}$ . Аналіз експериментальних даних поляризаційних гальваностатичних вимірювань у розчинах показує, що омичний спад потенціалу при густині струму до  $0,04...0,06 \text{ А/см}^2$  є незначним і не має істотного впливу на значення потенціалу анода. Перенапряга виділення хлору на покриттях  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  при густині струму  $0,1 \text{ А/см}^2$  не перевищує  $60 \text{ мВ}$ . За допомогою температурно-кінетичного методу встановлено кореляцію між енергією активації та перенапрягою. Висока ефективна енергія активації при перенапрязі вище  $95 \text{ мВ}$  вказує на електрохімічну природу поляризації. В умовах, що імітують промисловий електроліз розчину  $\text{NaCl}$ , кінетика реакції виділення хлору на покриттях  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  обмежується розрядом хлоридних аніонів.

**Ключові слова:** електроліз; малозношуваний анод; оксид кобальту; реакція виділення хлору; кінетика; поляризаційні дослідження

Рис.: 6. Табл.: 1. Бібл.: 9.

**Актуальність теми дослідження.** Практичне використання процесів електролізу водних розчинів хлоридів обмежується через відсутність дешевого й доступного малозношуваного анодного матеріалу. Одним із таких процесів є електрохімічний синтез розчинів гіпохлориту натрію. Цей процес дозволяє отримувати розведений водний розчин  $\text{NaClO}$ , який є потужним окисником і застосовується для відбілювання, дезінфекції і обробки питної води в централізованих/локальних системах водопостачання. Поширеним промисловим рішенням для електролізу концентрованих розчинів хлоридів є малозношувані композиційні оксидні рутенійово-титанові аноди (ОРТА), що складаються з титанової основи, на яку нанесено каталітично активний шар з діоксиду рутенію ( $\text{RuO}_2$ , 30 %мол.) і діоксиду титану ( $\text{TiO}_2$ , 70 %мол.). Однак ОРТА містять значну кількість рутенію (в перерахунку на метал до  $6...10 \text{ г/м}^2$ ), мають високу вартість і демонструють обмежену стійкість під час

електролізу розведених розчинів NaCl із концентрацією менше ніж 2 моль/дм<sup>3</sup>. Тому розробка малозношуваних анодів із каталітично активним шаром, що не містить металів платинової групи, є, безумовно, актуальним науково-технічним завданням.

**Постановка проблеми.** Альтернативою ОРТА можуть бути оксидно-металеві малозношувані аноди, каталітично активним компонентом яких є оксид кобальту Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Цей оксид має високу селективність щодо реакції виділення хлору й достатньо високу електропровідність. Практичному застосуванню оксидно-кобальтових електродів заважає декілька недоліків: погане зчеплення Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> з титановою основою, виникнення і зростання перехідного опору на межі оксидного шару й титанової основи при анодній поляризації, значний знос в умовах електролізу в кислих розчинах і відносно малий термін експлуатації. У роботі пропонується використання каталітично активного покриття з оксиду кобальту Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і оксиду титану TiO<sub>2</sub>, нанесеного на титанову основу з тонким проміжним шаром RuO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> (у перерахунку на металевий рутеній 0,1...0,5 г/м<sup>2</sup>). Композиційне покриття з оксидів Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> і TiO<sub>2</sub> можна отримати методом термічного розкладу покривних розчинів, що містять нітрат кобальту (II) і хлорид титану (IV). Оксид кобальту у вигляді шпінелі Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> забезпечує електрокаталітичну активність щодо анодного окиснення аніона хлориду до хлору за реакцією (1), яку також називають реакцією виділення хлору:



Оксид титану TiO<sub>2</sub> є хімічно інертним і забезпечує підвищену стійкість до зносу в агресивних умовах тривалої анодної поляризації. Дослідження кінетики реакції виділення хлору на запропонованих композиційних оксидних кобальт-титанових анодах (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>[RuO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>]Ti) дозволить встановити вплив складу активного оксидного шару (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>) на електрокаталітичну активність і визначити природу уповільненої стадії, тобто природу поляризації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Електроліз розчинів хлоридів лужних металів є одним із найбільш енергоємних та масштабних процесів промислового електрохімічного синтезу. Найважливішим елементом цієї технології є анодний матеріал. З моменту створення композиційних малозношуваних анодів у другій половині XX століття еталоном залишаються оксиди металів платинової групи, зокрема діоксид рутенію (RuO<sub>2</sub>) та діоксид іридію (IrO<sub>2</sub>), нанесені на титанову основу. Ці матеріали демонструють низьку перенапругу виділення хлору та високу стабільність у жорстких умовах анодної поляризації. Проте висока вартість і дефіцитність металів платинової групи стимулюють пошук альтернативних електрокаталізаторів реакції утворення хлору. Оксид кобальту (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) зі структурою шпінелі є одним з найбільш перспективних кандидатів серед неплатинових металів завдяки своїй високій корозійній стійкості в нейтральних і лужних середовищах та задовільній активності в кислих хлоридних розчинах.

У фундаментальних роботах [1; 2] проаналізовано науково-технічний ефект від створення малозношуваних анодів, який іноді називають поворотним моментом електрохімії XX сторіччя. Відзначено, що фундаментальна наука фокусується на зниженні перенапруги й каталітичній активності, тобто зниженні енергії активації реакції, а промисловість фокусується на зниженні загальної напруги на комірці електролізера і стабільності характеристик у часі. На підставі аналізу попередніх досліджень встановлено, що для успішного промислового використання стабільність матеріалу й конструкційні можливості часто важливіші за чисту електрокаталітичну активність. Визначено можливість використання індивідуальних оксидів перехідних металів, зокрема Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, і складніших композиційних систем для електрокаталізу широкого кола реакцій завдяки здатності змінювати ступінь окислення поверхні оксиду.

У роботі [3] було досліджено кінетику виділення хлору і кисню на чистому, термічно утвореному оксиді кобальту  $\text{Co}_3\text{O}_4$  зі структурою шпінелі в розведених і концентрованих хлоридних розчинах. Тафелівські нахили для всіх зразків були близькі до 60 мВ. Також встановлено, що використання нітратних сполук кобальту дає більш компактні плівки, тоді як органічні сполуки кобальту створюють більш пористі структури.

Дослідження [4] було присвячено введенню  $\text{Co}_3\text{O}_4$  у структуру класичних ОРТА для здешевлення. Ключовим аспектом дослідження є встановлення впливу складу, зокрема, мольного співвідношення компонентів, на електрокаталітичну активність і стабільність електрода в умовах тривалої анодної поляризації. Авторами встановлено, що додавання  $\text{Co}_3\text{O}_4$  у кількості до 30-40 % мол. не призводить до погіршення електрокаталітичної активності в реакції виділення хлору в порівнянні з ОРТА, а нахил Тафеля залишається близьким до 30-40 мВ.

У роботі [5] досліджено електрокаталітичну активність оксидів кобальту  $\text{Co}_3\text{O}_4$ , електрохімічно отриманих на поверхні поруватого нікелевого сплаву. Методом електрохімічної імпедансної спектроскопії було встановлено, що збільшення концентрації кисневих вакансій призводить до помітного зниження опору змінного струму та зростання густини струму, тобто підвищена дефектність структури шпінелі позитивно впливає на електропровідність і знижує перенапругу.

Автори дослідження [6] фіксують зміну парадигми в галузі електрокаталітичного виділення хлору й обґрунтовують необхідність переходу до матеріалів без вмісту металів платинової групи, серед яких оксид кобальту  $\text{Co}_3\text{O}_4$  посідає одне з ключових місць.

Більшість досліджень сходяться на тому, що реакція виділення хлору на термічно утвореному  $\text{Co}_3\text{O}_4$  зі структурою шпінелі відбувається за механізмом Фольмера-Гейровського [7] або Фольмера-Тафеля [8], залежно від потенціалу та структури поверхні. Тафелівські нахили для чистого  $\text{Co}_3\text{O}_4$  зазвичай знаходяться в діапазоні 40-60 мВ, що вище, ніж у еталонних ОРТА (30 мВ). Це вказує на те, що лімітуючою стадією є перенос другого електрона або рекомбінація. Термічно утворений  $\text{Co}_3\text{O}_4$  є напівпровідником р-типу, що знижує його ефективність при високих густинах струму. Для вирішення цієї проблеми можна створювати багатокомпонентні оксидні системи зі значним (>20 мол%) вмістом  $\text{Co}_3\text{O}_4$ .

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Процес анодного окиснення аніона хлориду до хлору на анодах ОРТА є надзвичайно важливим для промислового електролізу і привертав увагу великої кількості дослідників. Кількість публікацій щодо вивчення кінетики реакції виділення хлору на поверхні термічно отриманого оксиду кобальту  $\text{Co}_3\text{O}_4$  значно менша, а дослідження кінетики виділення хлору на активних композиційних покриттях, що містять  $\text{Co}_3\text{O}_4$  і  $\text{TiO}_2$ , взагалі відсутні.

**Мета дослідження** – вивчення впливу складу каталітично активного оксидного шару  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  на кінетику реакції виділення хлору в концентрованих хлоридних розчинах.

**Виклад основного матеріалу.** Процеси електролізу водних розчинів хлоридів відбуваються в стаціонарному режимі, тому для вивчення кінетичних параметрів реакції виділення хлору на малозношуваних оксидно-металевих анодах найчастіше використовується метод стаціонарної вольтамперометрії. Дослідження кінетики електрохімічного виділення газів взагалі та хлору зокрема пов'язані з низкою труднощів: впливом омичної складової ( $\Delta E_{\text{ом}}$ ) на значення анодного потенціалу, значним газонаповненням та екрануванням бульбашками газу поверхні електрода. Поляризаційні вимірювання при дослідженні електрокаталітичних властивостей покриттів на основі оксидів кобальту та титану  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  відбувались як без урахування омичної складової, так і комутаційним методом, що дозволяє враховувати внесок  $\Delta E_{\text{ом}}$  у значення анодного потенціалу. Вольтамперометричні вимірювання проводилися в діапазоні температур від 293 до 369 К з точністю  $\pm 0,5\text{K}$ .

Результати гальваностатичних поляризаційних вимірювань на  $\text{Co}_3\text{O}_4[\text{RuO}_2/\text{TiO}_2]\text{Ti}$  і  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2[\text{RuO}_2/\text{TiO}_2]\text{Ti}$ -электродах з різним вмістом  $\text{Co}_3\text{O}_4$  у концентрованих хлоридних розчинах, насичених хлором, наведено на рис. 1.

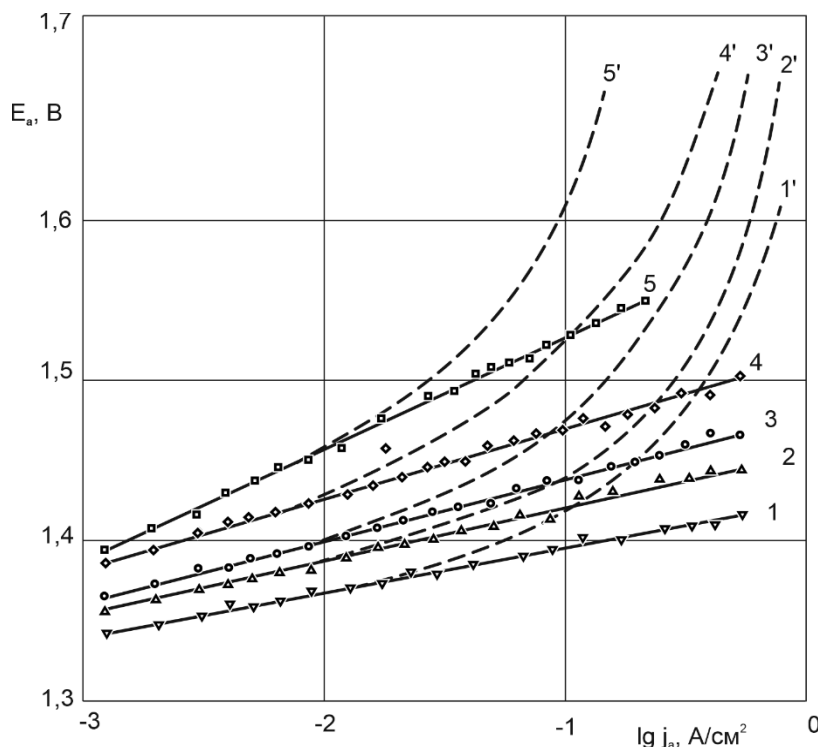


Рис. 1. Графічна інтерпретація результатів гальваностатичних поляризаційних вимірювань на  $\text{Co}_3\text{O}_4$  і  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях із різним вмістом  $\text{Co}_3\text{O}_4$  у розчинах  $\text{NaCl}$  4,8М насичених хлором при 343К і  $\text{pH} = 3,5$  з урахуванням  $\Delta E_{\text{ом}}$  (1, 2, 3, 4, 5) і без урахування  $\Delta E_{\text{ом}}$  (1', 2', 3', 4', 5'): 1,1' –  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (100 %мол.); 2,2' –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (30 %мол./70 %мол.); 3,3' –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (25 %мол./75 %мол.); 4,4' –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (21 %мол./79 %мол.) і 5,5' –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (16 %мол./84 %мол.)

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що при густинах струму до 0,04...0,06  $\text{A}/\text{cm}^2$  омична складова  $\Delta E_{\text{ом}}$  не є суттєвою і майже не впливає на значення вимірюваного анодного потенціалу ( $E_a$ ). Доказом того, що зростання  $E_a$  відбувається через омичне падіння напруги в оксидному шарі, може бути характер залежності розрахункового значення  $\Delta E_{\text{ом}}$ , отриманого з рис. 1, від густини струму. Відповідні графіки, наведені на рис. 2, мають лінійний характер.

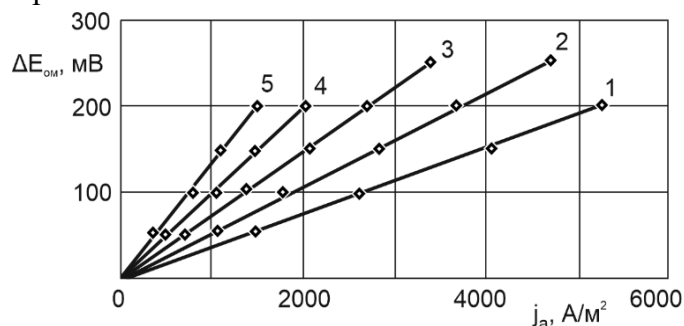


Рис. 2. Залежність омичної складової падіння напруги  $\Delta E_{\text{ом}}$  в аноді від густини струму в розчині 4,8М  $\text{NaCl}$  насиченому хлором при  $\text{pH} = 3,5$  і різним вмістом  $\text{Co}_3\text{O}_4$ : 1 –  $\text{Co}_3\text{O}_4$  (100 %мол.); 2 –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (30 %мол./70 %мол.); 3 –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (25 %мол./75 %мол.); 4 –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (21 %мол./79 %мол.) і 5 –  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$  (16 %мол./84 %мол.)

Джерело: розроблено авторами.

Лінійний характер цієї залежності та той факт, що отримані прямі проходять через початок координат, дозволяють однозначно стверджувати, що падіння напруги відбувається за постійного омичного опору. Величина  $\Delta E_{\text{ом}}$  залежить від природи електродного матеріалу. Найменші омичні втрати були визначені на  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -електродах.  $\Delta E_{\text{ом}}$  на запропонованих  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях трохи вище.  $\text{Co}_3\text{O}_4$  є напівпровідником р-типу з малою шириною забороненої зони і значні омичні втрати на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях пояснюються труднощами в перенесенні заряду через збіднення поверхневого шару носіями заряду р-типу.

Перенапруга виділення хлору ( $\eta$ ) з хлоридних розчинів на  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -покритті невелика й подібна до перенапруги, що спостерігається на ОРТА. На рис. 3 наведено залежність перенапруги виділення хлору на ОРТА,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  та запропонованому  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покритті від анодної густини струму в концентрованому розчині  $\text{NaCl}$ .

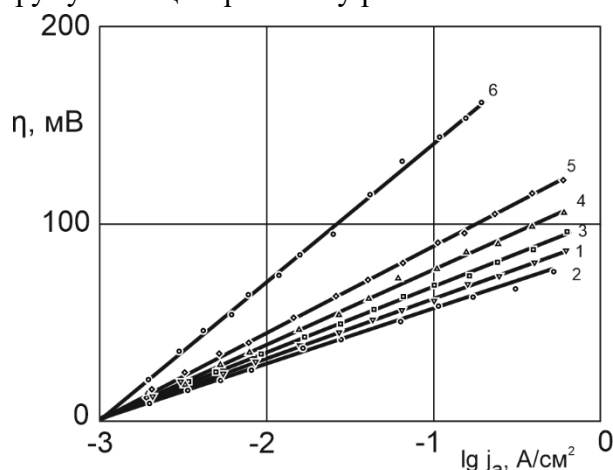


Рис. 3. Залежність перенапруги анодного процесу від густини струму в розчині  $\text{NaCl}$  4,8 М насиченому хлором при 343К і  $\text{pH} = 3,5$  на ОРТА,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  і  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях різного складу, % мол.: 1 – ОРТА; 2 – 100  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ; 3 – 30/70  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 4 – 25/75  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 5 – 21/79  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ ; 6 – 16/84  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$

Джерело: розроблено авторами.

Найнижче значення  $\eta$  було отримано на  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -покритті, дещо більше  $\eta$  спостерігалося на ОРТА. Виявлена різниця є незначною і може бути пояснена більш розвиненою поверхнею зразків з  $\text{Co}_3\text{O}_4$ -покриттям. Нахили графічних залежностей на рис. 3 відрізняються незначною мірою. Причому  $\eta$  на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покритті дещо вища, ніж на ОРТА, проте різниця невелика за абсолютною величиною і при густині струму 0,1  $\text{A}/\text{cm}^2$  не перевищує 60 мВ.

Відомо, що реакція виділення хлору на ОРТА і  $\text{Co}_3\text{O}_4$  у концентрованих хлоридних розчинах, насичених хлором при  $\text{pH} < 4$ , лімітується стадією розряду аніону  $\text{Cl}^-$ . Схожість характеру поляризаційних залежностей, отриманих на ОРТА,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  і запропонованих електродах дозволяє зробити припущення, що лімітувати процес у разі  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ [ $\text{RuO}_2/\text{TiO}_2$ ]-електродів буде стадія розряду. Для обґрунтування цього припущення було проведено дослідження впливу температури на кінетику анодного процесу. Графічна інтерпретація результатів наведена на рис. 4. Отримані результати були оброблені відповідно до температурно-кінетичного методу (ТКМ) [9]. ТКМ базується на аналізі залежності швидкості електрохімічних процесів від температури, що дозволяє отримати інформацію про енергетичні бар'єри, механізми реакцій та фактори, які впливають на їх перебіг. Основна мета застосування ТКМ в цій роботі полягає в визначенні енергії активації реакції виділення хлору.



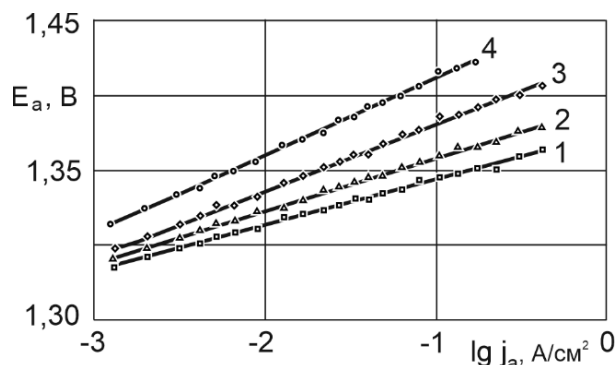


Рис. 4. Анодні поляризаційні залежності на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях в розчинах  $\text{NaCl}$  4,8 М насичених хлором при  $\text{pH} = 3,5$  і температурах, К: 1 – 369; 2 – 343; 3 – 318; 4 – 293  
Джерело: розроблено авторами.

З експериментальних залежностей, побудованих у координатах  $\eta - \lg j_a$  і наведених на рис. 5, визначено, що зниження перенапруги виділення хлору на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покритті з підвищенням температури становить від 0,65 до 1 мВ/град.

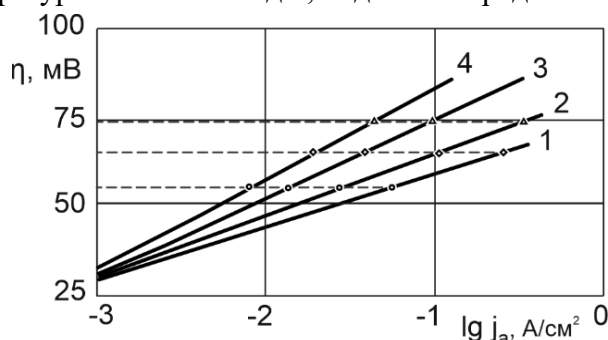


Рис. 5. Залежність перенапруги анодної реакції  $\eta$  від  $\lg j_a$  на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -покриттях у розчинах  $\text{NaCl}$  4,8М насичених хлором при  $\text{pH} = 3,5$  і температурах, К:  
1 – 369; 2 – 343; 3 – 318; 4 – 293

Джерело: розроблено авторами.

За результатами наведеними на рис. 5, було визначено значення анодної густини струму  $j_a$  за різних температур при  $\eta = \text{const}$  і побудовано залежності  $\lg j_a$  від зворотної температури  $T^{-1}$  (рис. 6). Ця залежність має прямолінійний характер і нахил прямих збільшується з підвищенням перенапруги виділення хлору. Найменший нахил прямої спостерігається при перенапрузі 30 мВ.

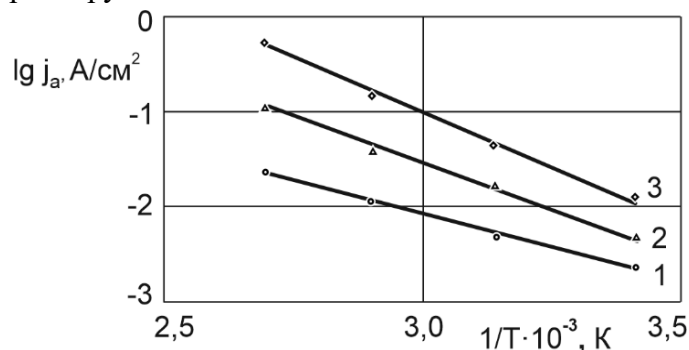


Рис. 6. Залежність  $\lg j_a$  від зворотної температури  $1/T$  на  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{TiO}_2$ -у в розчинах  $\text{NaCl}$  4,8М насичених хлором при  $\text{pH} = 3,5$  і перенапругах, мВ:  
1 – 30; 2 – 40; 3 – 50

Джерело: розроблено авторами.

Відповідно до температурно-кінетичного методу за нахилом залежності  $\lg j - T^{-1}$  можна визначити ефективну енергію активації процесу, пов'язаного з  $\lg j$  рівнянням:

$$\lg j = B - A_{\text{eff}} \cdot R^{-1} \cdot T^{-1}, \quad (2)$$

де  $A_{\text{eff}}$  – ефективна енергія активації, кДж/моль;  $B$  – константа.

Фактична величина  $A_{\text{eff}} \cdot R^{-1} \cdot T^{-1}$  дорівнює тангенсу кута нахилу прямих на рис. 6. Тому

$$A_{\text{eff}} = 2,3026 \cdot R \cdot \lg \alpha, \quad (3)$$

де  $\lg \alpha$  – тангенс кута нахилу прямої в координатах  $\lg j - T^{-1}$ ;

2,3026 – коефіцієнт переходу від натурального до десяткового логарифма.

Розраховані величини ефективної енергії активації наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Ефективна енергія активації реакції виділення хлору в розчині NaCl 4,8 M

| Перенапруга $\eta$ , В | Ефективна енергія активації $A_{\text{eff}}$ , кДж/моль |
|------------------------|---------------------------------------------------------|
| 0,050                  | 25,39                                                   |
| 0,065                  | 30,58                                                   |
| 0,080                  | 36,59                                                   |
| 0,095                  | 40,95                                                   |
| 0,110                  | 46,96                                                   |

Джерело: розроблено авторами.

Залежність ефективної енергії активації від перенапруги та те, що значення  $A_{\text{eff}}$  при  $\eta > 95$  мВ перевищують 40 кДж/моль, вказують на електрохімічну природу поляризації.

**Висновки.** Дослідження кінетики реакції виділення хлору дозволяє зробити висновок, що в умовах електролізу концентрованого розчину NaCl при 343 K і pH = 3,5 процес лімітується розрядом аніона хлориду. При густині струму до 0,1 А/см<sup>2</sup> перенапруга процесу на покритті Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> (30 %мол./70 %мол.) відрізняється від ОРТА на 20...25 мВ і становить 55...60 мВ, тобто каталітичну активність такого оксидного шару можна порівняти з активністю ОРТА. Для додаткового уточнення кінетичних параметрів реакції виділення хлору й визначення порядків реакції потрібні додаткові дослідження при різних концентраціях NaCl і різному парціальному тиску хлору.

### Список використаних джерел

1. Karlsson, R. K., & Cornell, A. (2016). Selectivity between oxygen and chlorine evolution in the chlor-alkali and chlorate processes. *Chemical Reviews*, 116(5), 2982–3028. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00389>.
2. Trasatti, S. (2000). Electrocatalysis: Understanding the success of DSA. *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2377–2385. [https://doi.org/10.1016/s0013-4686\(00\)00338-8](https://doi.org/10.1016/s0013-4686(00)00338-8).
3. Hansen, H. A., Man, I. C., Studt, F., Abild-Pedersen, F., Bligaard, T., & Rossmeisl, J. (2010). Electrochemical chlorine evolution at rutile oxide (110) surfaces. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(1), 283–290. <https://doi.org/10.1039/b917459a>.
4. Panić, V. V., Dekanski, A., Milonjić, S. K., Atanasoski, R. T., & Nikolić, B. Ž. (1999). RuO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coated titanium anodes obtained by the sol–gel procedure and their electrochemical behaviour in the chlorine evolution reaction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 157(1-3), 269–274. [https://doi.org/10.1016/s0927-7757\(99\)00094-1](https://doi.org/10.1016/s0927-7757(99)00094-1).
5. Pan, G.-T., & Nikoloski, A. N. (2025). The electrochemical performance of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> electrodes with platinum nanoparticles for chlorine evolution. *Inorganics*, 13(11), 355. <https://doi.org/10.3390/inorganics13110355>.
6. Kim, J., Usama, M., Exner, K. S., & Joo, S. H. (2024). Renaissance of chlorine evolution reaction: Emerging theory and catalytic materials. *Angewandte Chemie International Edition*. <https://doi.org/10.1002/anie.202417293>.
7. Kuo, D.-Y., Paik, H., Nelson, J. N., Shen, K. M., Schlom, D. G., & Suntivich, J. (2019). Chlorine evolution reaction electrocatalysis on RuO<sub>2</sub>(110) and IrO<sub>2</sub>(110) grown using molecular-beam epitaxy. *The Journal of Chemical Physics*, 150(4), 041726. <https://doi.org/10.1063/1.5051429>.

8. Vos, J. G., Liu, Z., Speck, F. D., Perini, N., Fu, W., Cherevko, S., & Koper, M. T. M. (2019). Selectivity trends between oxygen evolution and chlorine evolution on iridium-based double perovskites in acidic media. *ACS Catalysis*, 9(9), 8561–8574. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b01159>.

9. Kurzweil, P. (2023). Electrochemical devices: History of electrochemistry. Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-96022-9.00022-0>.

### References

1. Karlsson, R. K., & Cornell, A. (2016). Selectivity between oxygen and chlorine evolution in the chlor-alkali and chlorate processes. *Chemical Reviews*, 116(5), 2982–3028. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00389>.

2. Trasatti, S. (2000). Electrocatalysis: Understanding the success of DSA. *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2377–2385. [https://doi.org/10.1016/s0013-4686\(00\)00338-8](https://doi.org/10.1016/s0013-4686(00)00338-8).

3. Hansen, H. A., Man, I. C., Studt, F., Abild-Pedersen, F., Bligaard, T., & Rossmeisl, J. (2010). Electrochemical chlorine evolution at rutile oxide (110) surfaces. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 12(1), 283–290. <https://doi.org/10.1039/b917459a>.

4. Panić, V. V., Dekanski, A., Milonjić, S. K., Atanasoski, R. T., & Nikolić, B. Ž. (1999). RuO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> coated titanium anodes obtained by the sol–gel procedure and their electrochemical behaviour in the chlorine evolution reaction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 157(1-3), 269–274. [https://doi.org/10.1016/s0927-7757\(99\)00094-1](https://doi.org/10.1016/s0927-7757(99)00094-1).

5. Pan, G.-T., & Nikoloski, A. N. (2025). The electrochemical performance of Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> electrodes with platinum nanoparticles for chlorine evolution. *Inorganics*, 13(11), 355. <https://doi.org/10.3390/inorganics13110355>.

6. Kim, J., Usama, M., Exner, K. S., & Joo, S. H. (2024). Renaissance of chlorine evolution reaction: Emerging theory and catalytic materials. *Angewandte Chemie International Edition*. <https://doi.org/10.1002/anie.202417293>.

7. Kuo, D.-Y., Paik, H., Nelson, J. N., Shen, K. M., Schlom, D. G., & Suntivich, J. (2019). Chlorine evolution reaction electrocatalysis on RuO<sub>2</sub>(110) and IrO<sub>2</sub>(110) grown using molecular-beam epitaxy. *The Journal of Chemical Physics*, 150(4), 041726. <https://doi.org/10.1063/1.5051429>.

8. Vos, J. G., Liu, Z., Speck, F. D., Perini, N., Fu, W., Cherevko, S., & Koper, M. T. M. (2019). Selectivity trends between oxygen evolution and chlorine evolution on iridium-based double perovskites in acidic media. *ACS Catalysis*, 9(9), 8561–8574. <https://doi.org/10.1021/acscatal.9b01159>.

9. Kurzweil, P. (2023). Electrochemical devices: History of electrochemistry. Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering. *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-96022-9.00022-0>.

Дата першого надходження статті до видання: 28.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.12.2025

UDC 621.357

**Oleksandr Brovin<sup>1</sup>, Yuliia Kovalenko<sup>2</sup>, Serhii Leshchenko<sup>3</sup>,  
Svitlana Deribo<sup>4</sup>, Natalia Chorna<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Engineering Electrochemistry

**E-mail:** [oleksandr.brovin@khpi.edu.ua](mailto:oleksandr.brovin@khpi.edu.ua). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-9064-1199>

**ResearcherID:** [HHM-4978-2022](https://orcid.org/0000-0002-9064-1199). **SCOPUS Author ID:** [57220217768](https://orcid.org/0000-0002-9064-1199)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Engineering Electrochemistry  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Kharkiv, Ukraine)

**E-mail:** [yuliia.kovalenko@khpi.edu.ua](mailto:yuliia.kovalenko@khpi.edu.ua). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0002-7523-8545>

**ResearcherID:** [PDW-4006-2025](https://orcid.org/0000-0002-7523-8545). **SCOPUS Author ID:** [59295257300](https://orcid.org/0000-0002-7523-8545)

<sup>3</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Engineering Electrochemistry  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Kharkiv, Ukraine)

**E-mail:** [serhii.leshchenko@khpi.edu.ua](mailto:serhii.leshchenko@khpi.edu.ua). **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-2918-9575>

**ResearcherID:** [PDW-7196-2025](https://orcid.org/0000-0003-2918-9575). **SCOPUS Author ID:** [8975907100](https://orcid.org/0000-0003-2918-9575)

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Engineering Electrochemistry  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: [svitlana.deribo@khpі.edu.ua](mailto:svitlana.deribo@khpі.edu.ua). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1790-9857>

ResearcherID: [PCT-8815-2025](https://orcid.org/0000-0002-1790-9857). SCOPUS Author ID: [6507471701](https://orcid.org/0000-0002-1790-9857)

<sup>5</sup>PhD in Technical Sciences, Senior Researcher of Department of Thermogasdynamics of Power Machines  
Anatolii Pidhomyi Institute of Power Machines and Systems of NAS of Ukraine

E-mail: [nataliyachernaya7@gmail.com](mailto:nataliyachernaya7@gmail.com). ORCID <https://orcid.org/0000-0002-9161-0298>

ResearcherID: [T-8667-2018](https://orcid.org/0000-0002-9161-0298). SCOPUS Author ID: [57190837440](https://orcid.org/0000-0002-9161-0298)

## INFLUENCE OF ACTIVE LAYER COMPOSITION OF COBALT-TITANIUM OXIDE ANODE ON KINETICS OF CHLORINE EVOLUTION REACTION

*The high cost of anode materials often constrains the application of electrolysis for sodium hypochlorite synthesis. The industry standard is mixed metal oxide anodes, also known as Dimensionally Stable Anodes (DSA), based on ruthenium dioxide (RuO<sub>2</sub>). DSA demonstrates high efficiency but relies on expensive platinum group metals and exhibits limited stability in dilute solutions. This study proposes an alternative metal oxide anode with an active catalytic layer of a mixture of cobalt oxide (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) and titanium oxide (TiO<sub>2</sub>), applied over a thin intermediate layer of ruthenium dioxide on a titanium substrate.*

*The primary objective is to investigate the influence of the active layer composition on the kinetics of the chlorine evolution reaction and to determine the nature of the polarization in concentrated NaCl solutions. Analysis of experimental data from galvanostatic polarization measurements in NaCl 4.8 M solutions (pH 3.5, 343 K) shows that the ohmic potential drop at current densities up to 0.04–0.06 A/cm<sup>2</sup> is small and has no significant effect on the value of the anode potential. Comparative analysis revealed that while pure Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> coatings demonstrate the lowest ohmic losses, the mixed Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> coatings exhibit higher resistance values. Despite the ohmic component, the electrocatalytic efficiency of the proposed active catalytic layer remains high. The chlorine evolution overpotential on Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> coatings at a current density of 0.1 A/cm<sup>2</sup> does not exceed 60 mV. This performance is comparable to DSA based on ruthenium dioxide, with the difference in overpotential being relatively small, amounting to 20 – 25 mV. Analysis performed using the temperature-kinetic method established a correlation between activation energy and overpotential ( $\eta$ ). The calculated effective activation energy increases from 25.39 kJ/mol at  $\eta = 0.05$  V to 46.96 kJ/mol at  $\eta = 0.11$  V. The high effective activation energy (40 kJ/mol) at  $\eta > 95$  mV indicates that the polarization is electrochemical in nature. The study concludes that under conditions simulating the industrial electrolysis of a concentrated NaCl solution, the kinetics of the chlorine evolution reaction on Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub> coatings are limited by the discharge of chloride anions.*

**Keywords:** electrolysis; dimensionally stable anode; cobalt oxide; chlorine evolution reaction; kinetics; polarization studies.

Fig.: 6. Table: 1. References: 9.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-303-313](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-303-313)

УДК 664.681.2

**Наталія Павлівна Буяльська<sup>1</sup>, Наталя Миколаївна Денисова<sup>2</sup>**<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [buialska@gmail.com](mailto:buialska@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>. ResearcherID: HME-2652-2023<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: [4386793@gmail.com](mailto:4386793@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-5967-2815>. ResearcherID: JFS-1548-2023

## **ЗНИЖЕННЯ ГЛІКЕМІЧНОСТІ БІСКВІТНИХ ВИРОБІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ЕКОБЕЗПЕЧНИХ ЦУКРОЗАМІННИКІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ**

Встановлено, що з додаванням натуральних цукрозамінників, а саме еритриту, екстракту стевії та інуліну, окремо та в комбінації, у рецептуру бісквітних напівфабрикатів можна отримати бісквіт із редукованою калорійністю та глікемічністю. Еритрит характеризується найвищою піноутворювальною здатністю порівняно із сахарозою, проте знижує стійкість піни. Додавання інуліну в кількості 10 % до маси борошна до суміші з меланжем підвищує стійкість піни. Інουλін, завдяки високим вологоутримуючим властивостям, покращує пористість, м'якість і вологість бісквіта, компенсуючи сухість, спричинену еритритом, а також позитивно впливає на якість виробів у процесі зберігання. Комплексний аналіз фізико-хімічних та органолептичних показників дозволив визначити оптимальну композицію інгредієнтів, при чому енергетична цінність такого зразка становить 198 ккал проти 342 ккал контрольного.

**Ключові слова:** бісквітний напівфабрикат; цукрозамінники; глікемічний показник; еритрит; інулін; стевія.

Табл.: 5. Рис.: 5. Бібл.: 13.

**Актуальність теми дослідження.** В умовах розвитку харчової промисловості однією з основних тенденцій є підбір раціонального харчування з позиції профілактики порушень вуглеводного обміну. Зростання поширеності цукрового діабету, ожиріння та метаболічного синдрому зумовлює необхідність зниження споживання продуктів із високим глікемічним індексом, зокрема борошняних кондитерських виробів. Бісквітні вироби – одні з найпоширеніших кондитерських борошняних виробів, які характеризуються високим вмістом цукру, що обмежує можливість їх використання в раціоні людей із порушеннями вуглеводного обміну та споживачів, які дотримуються принципів здорового харчування.

Одним із перспективних напрямів удосконалення рецептур бісквітних виробів є заміна сахарози на альтернативні підсолоджувачі та функціональні інгредієнти, зокрема еритрит, інулін і стевію. Еритрит характеризується низькою калорійністю та практично нульовим глікемічним індексом, інулін проявляє пребіотичні властивості та здатність знижувати глікемічний відгук продуктів, а стевія забезпечує необхідну солодкість без підвищення рівня глюкози в крові.

Використання зазначених інгредієнтів дозволяє не лише знизити глікемічність бісквітних виробів, але й підвищити їхню біологічну цінність та розширити асортимент функціональних кондитерських продуктів. У зв'язку з цим дослідження впливу еритриту, інуліну та стевії на технологічні, органолептичні та харчові властивості бісквітних виробів є актуальним і має важливе наукове та практичне значення.

**Постановка проблеми.** Цукровий діабет належить до досить поширених ендокринних захворювань, від якого у світі страждає приблизно до 5 % населення, а в Україні зареєстровано понад 1 мільйон хворих [1]. З кожним роком цукровий діабет прогресує та «молодшає». Така ситуація суттєво обмежує вибір продуктів харчування та унеможливає задоволення харчових потреб населення.

Серед борошняних кондитерських виробів широку популярність в Україні здобули бісквіти, які мають легку консистенцію, характерний приємний смак і запах. Цей продукт у нашій країні виробляється переважно за традиційними технологіями. Їхньою відносно не-

гатиною стороною є висока енергетична цінність, яка зумовлена вмістом швидких вуглеводів, а також низький рівень вмісту активних речовин. Тому зниження їхньої калорійності може суттєво підвищити привабливість цього виду кондитерських виробів для сучасних споживачів. Одним із базових напрямів вирішення цієї проблеми є використання цукрозамінників для зниження енергетичної цінності в технології бісквітних виробів [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні в науковій літературі накопичено певний обсяг відомостей про використання замінників сахарози. Насамперед можна виділити дослідження В. В. Дорохович, А. Г. Абрамової, які займалися вивченням особливостей використання низькоглікемічних та низькокалорійних замінників сахарози (еритритол, мальтитол та ізомальтитол) у технології бісквітів діабетичного застосування [3; 4; 5]. Отримані результати показують, що на відміну від інших замінників цукру мальтитол не вимагає будь-яких коригувань у технологічному процесі, ізомальтитол найкраще поєднувати з тепловим способом отримання тіста, а еритритол викликає необхідність змін у режимі випікання.

Дослідження щодо додавання інуліну [6; 7] показали покращення реологічних показників напівфабрикатів, кращих органолептичних показників та якісних показників готових виробів (яскраво виражена наявність тонкостінних пір). Отримані вироби менш схильні до псування бактеріями і грибами. Автори стверджують, що добавки з інуліном призводять до більш стійкого утримання води у зв'язку зі швидким формуванням хімічних зв'язків між білковою матрицею і гідратованим інуліном.

Оскільки інулін міститься у деяких видах рослинної сировини, проаналізовано дослідження із внесенням інулінвмісної сировини до рецептур борошняних кондитерських виробів. Встановлено [8], що додавання продуктів із цикорію позитивно позначається на швидкості тістоутворення, стабільності та еластичності тістових напівфабрикатів. Додавання топінамбура [9], дозволяє підвищити водопоглинаючу здатність борошна та показники пружної деформації тіста, спостерігається зниження обсягу відмитої клейковини, з одночасним зростанням її сили.

Аналіз досліджень із додаванням еламіну та стевіозиду, як замінників цукру [10], показує, що заміна 50 % цукру на стевіозид і 1,5 % еламіну зберігає необхідні показники готових виробів за рахунок зв'язування води. Встановлено, що в'язкість тіста збільшується еламіном, а стевіазлоїд навпаки розріджує тісто, тому оптимальне співвідношення 0,3 % стевіозиду та 1,5 % еламіну до маси яєць.

Використання як замінників цукру суміші фруктози та еритритолу [11] викликає зниження пружності м'якшу на 0,1 %, але зберігається оптимальний рівень вологості та структури бісквітного напівфабрикату доволі тривалий час.

Таким чином, виробництво бісквітних виробів є важливою складовою формування традиційного харчового раціону населення, а заміна сахарози на цукрозамінники становить актуальний науково-технічний напрям у галузі харчової науки. Результати попередніх досліджень свідчать про доцільність і перспективність такої заміни.

Серед наявних цукрозамінників найбільш ефективними є природні компоненти – інулін, еритритол та екстракт стевії. Їх індивідуальне використання забезпечує отримання виробів із належними якісними й органолептичними характеристиками в межах нормативних значень. Водночас комбіноване застосування зазначених замінників залишається недостатньо вивченим, тому дослідження їхнього спільного впливу на технологію виробництва та глікемічність готової продукції є основним завданням даної роботи.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Незважаючи на те, що використанню цукрозамінників присвячено чимало досліджень, питання застосування комбінації натуральних цукрозамінників еритриту, інуліну та стевії в технології бісквітних напівфабрикатів залишалися фактично не освітленими тією мірою, яка б задовольняла запитам виробництва.

**Мета дослідження** – проаналізувати можливість зниження глікемічності бісквітних напівфабрикатів за рахунок заміни сахарози комбінацією натуральних цукрозамінників еритриту, інуліну та стевії за умови збереження якісних показників виробів.

**Виклад основного матеріалу.** Дослідження використання комплексу цукрозамінників у технології бісквітних виробів проведено в лабораторних умовах кафедри харчових технологій та екології НУ «Чернігівська політехніка». Базова рецептура бісквітного напівфабрикату «Основний», за традиційною технологією. Досліджували показники якості сировини, тіста бісквітного та готових бісквітних виробів із додаванням натуральних цукрозамінників, а саме еритриту, інуліну та стевії та їхніх сумішей. Результати досліджень аналізували на відповідність ДСТУ 8001:2015 (органолептичні та фізико-хімічні показники готових бісквітних напівфабрикатів). Методи оцінки якості бісквітних напівфабрикатів, використані відповідно до затверджених методик, зазначених у ДСТУ 4619:2006; 4683:2006; 4910:2008; 8001:2015; 4460:2018.

Оскільки цукор у бісквітних виробках виконує не лише функцію підсолоджувача, а й бере участь у формуванні об'єму та структури під час збивання з меланжем, а також забезпечує утримання вологи та утворення забарвленої скоринки внаслідок реакцій Майяра, то застосування цукрозамінників потребує підбору їх оптимальної комбінації, враховуючи особливості кожного:

- еритрит характеризується коефіцієнтом солодкості 0,6 відносно сахарози та нульовим глікемічним індексом, однак не забезпечує належної піностійкості, має низьку гігроскопічність і може спричиняти крихкість та прискорене висихання виробів;

- інулін, як низькокалорійний полісахарид із низьким глікемічним індексом, володіє гелеутворюючими властивостями, імітує об'ємоутворюючу функцію цукру, покращує пористість і консистенцію бісквітів і сприяє збереженню вологи, а також підсилює смаковий ефект стевії, що дозволяє знизити її дозування та мінімізувати сторонні присмаки та підвищує вміст харчових волокон у готових виробках і проявляє пребіотичні властивості;

- стевія не має структуроутворюючих властивостей, однак за рахунок високої солодкості (200...300 відносно цукру) забезпечує необхідний рівень підсолодження та компенсує недостатню солодкість еритриту й інуліну.

Тому обрано, що інулін вносити в об'ємі 2, 4 та 10 % від маси борошна (дослідні зразки 1-3). У дослідний зразок (ДЗ) 4 вносимо еритрит в пропорційній кількості до сахарози; в ДЗ 5 – еритрит і стевія; ДЗ 6 – еритрит, стевія та інулін. Кількість екстракту стевії визначали з урахуванням її солодкості та наявності еритриту в рецептурі.

Оскільки додавання крохмалю зв'язує надлишкову вологу та формує рівномірну пористість, а метою роботи є зниження глікемічності виробів, то у зразок ДЗ 7 його не вносили.

У рецептурі ДЗ 8 еритрит і стевію вводили у вигляді комплексної добавки із солодкістю, еквівалентною сахарозі, що обґрунтовано технологічною доцільністю її використання в умовах промислового виробництва.

Випікання контрольного зразка та зразків 1 – 3 проводили за температури 180 °С протягом 30-35 хвилин, для інших зразків (4 – 8) випікання проводили за температури 150 °С протягом 40 – 45 хвилин.

На першому етапі експериментальних досліджень вивчали вплив інуліну, стевії та еритриту на піноутворюючу здатність і стійкість піни в сумішах меланжу з цукрозамінниками. Відомо, що сахароза підвищує стійкість піни за рахунок збільшення в'язкості системи, проте знижує інтенсивність піноутворення порівняно з меланжем без добавок. З огляду на визначальний вплив сахарози на процес піноутворення меланжу передбачалося, що застосування цукрозамінників також істотно впливатиме на ці показники.



Таблиця 1 – Рецептури дослідних зразків (ДЗ) для лабораторної випічки

| Найменування сировини                 | Витрати сировини, г/100 г |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                       | Контрольний зразок        | ДЗ 1   | ДЗ 2   | ДЗ 3   | ДЗ 4   | ДЗ 5   | ДЗ 6   | ДЗ 7   | ДЗ 8   |
| Борошно пшеничне вищого ґатунку       | 28,12                     | 27,57  | 27,04  | 25,56  | 28,12  | 28,12  | 25,56  | 32,50  | 32,76  |
| Крохмаль картопляний                  | 69,4                      | 6,94   | 6,94   | 6,94   | 6,94   | 6,94   | 6,94   | -      | -      |
| Меланж                                | 57,85                     | 57,85  | 57,85  | 57,85  | 57,85  | 57,85  | 57,85  | 57,85  | 57,85  |
| Цукор білий                           | 34,71                     | 34,70  | 34,70  | 34,70  | -      | -      | -      | -      | -      |
| Есенція                               | 0,35                      | 0,35   | 0,35   | 0,35   | 0,35   | 0,35   | 0,35   | 0,35   | 0,35   |
| Інулін                                | -                         | 0,55   | 1,08   | 2,56   | -      | -      | 2,56   | 3,25   | 3,28   |
| Еритрит                               | -                         | -      | -      | -      | 34,70  | 34,20  | 36,20  | 33,51  | -      |
| Стевія                                | -                         | -      | -      | -      | -      | 0,50   | 0,50   | 0,50   | -      |
| Комплексна добавка «еритрит + стевія» | -                         | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | 33,72  |
| Разом                                 | 127,98                    | 127,96 | 127,96 | 127,96 | 127,96 | 127,96 | 127,96 | 127,96 | 127,96 |

Джерело: розроблено авторами.

Цукрозамінники вносили в кількостях, передбачених рецептурами дослідних зразків (табл. 1). Збивання здійснювали з частотою обертання 1000 об./хв. Значення показників піноутворюючої здатності наведено на рис. 1.

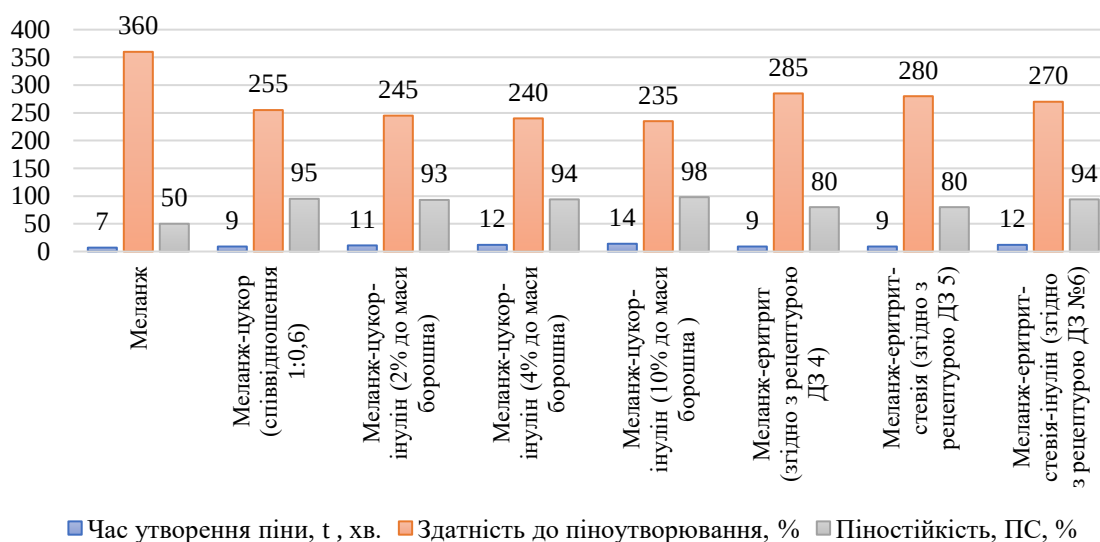


Рис. 1. Здатність до піноутворення (ЗПУ), піностійкість (ПС) та час, за який відбувається максимальне утворення піни (t)

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, порівняно із системою «цукор – меланж», найвищу піноутворювальну здатність демонструє суміш «меланж – еритрит». Введення сте́вії та еретриту в дослідному зразку впливає на зниження цього показника. Додавання інуліну спричиняє незначне зменшення піноутворювальної здатності та подовження тривалості збивання до досягнення максимального об'єму піни порівняно із сахарозою.

Водночас визначальним показником якості є стабільність піни (рис. 1). У системах натуральних цукрозамінників з меланжем присутність еритриту зумовлює зниження піностійкості приблизно на 20 % протягом однієї години, тоді як у системі «меланж – сахароза» цей показник залишається на високому рівні та становить 95 %. За вмісту інуліну 2 і 4 % значення піностійкості практично не відрізняються від контролю. Підвищення концентрації інуліну до 10 % позитивно впливає на стабільність піни, збільшуючи її до 94 %. Це пояснюється



гідрофільними властивостями інуліну, який зв'язує вільну вологу та сприяє зміцненню піноструктури. Зважаючи на високу піноутворювальну здатність еритриту за одночасно зниженої стійкості піни, доцільним є введення інуліну в кількості 10 % до рецептури бісквітних напівфабрикатів. Дані щодо вологості та густини бісквітного тіста наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вологість і густина бісквітного тіста з натуральними цукрозамінниками

| Зразки   | Показники    |                            | Зразки | Показники    |                            | Зразки | Показники    |                            |
|----------|--------------|----------------------------|--------|--------------|----------------------------|--------|--------------|----------------------------|
|          | Вологість, % | Густина, г/см <sup>3</sup> |        | Вологість, % | Густина, г/см <sup>3</sup> |        | Вологість, % | Густина, г/см <sup>3</sup> |
| Контроль | 37,2         | 0,33                       | ДЗ 3   | 37,06        | 0,36                       | ДЗ 6   | 36,27        | 0,38                       |
| ДЗ 1     | 36,12        | 0,34                       | ДЗ 4   | 36,40        | 0,41                       | ДЗ 7   | 36,16        | 0,40                       |
| ДЗ 2     | 36,12        | 0,34                       | ДЗ 5   | 36,30        | 0,38                       | ДЗ 8   | 36,20        | 0,40                       |

Джерело: розроблено авторами.

Встановлено, що використання еритриту зумовлює підвищення густини бісквітного тіста. Це пояснюється низькою піностійкістю системи «меланж – еритрит», унаслідок чого під час введення борошна відбувається інтенсивне руйнування піни, що призводить до ущільнення тіста та негативно позначається на якості готових виробів.

Внесення інуліну також сприяє зміцненню структури тіста, що пов'язано з його здатністю взаємодіяти з білковими компонентами та крохмалем пшеничного борошна. Водночас така дія позитивно відображається на показниках якості готової продукції.

Оцінку якості готових бісквітних виробів здійснювали за показниками вологості, пористості та питомого об'єму. Хоча останній не регламентується нормативною документацією, вони є важливими критеріями споживчих властивостей бісквітів. Результати досліджень наведено на рис. 2.

За результатами експерименту встановлено, що введення інуліну сприяє зростанню пористості бісквіта, причому зі збільшенням його концентрації цей показник підвищується. Найвищі значення пористості зафіксовано при внесенні 10 % інуліну до маси борошна. Використання еритриту призводить до зниження вологості та пористості бісквітних напівфабрикатів, однак його поєднання з інуліном, який характеризується вираженими вологоутримуючими властивостями, дозволяє підвищити зазначені показники до рівня контрольного зразка.

Результати органолептичної оцінки дослідних зразків, а також зовнішній вигляд готових виробів у розрізі представлені на рис. 3 та в табл. 3, 4.

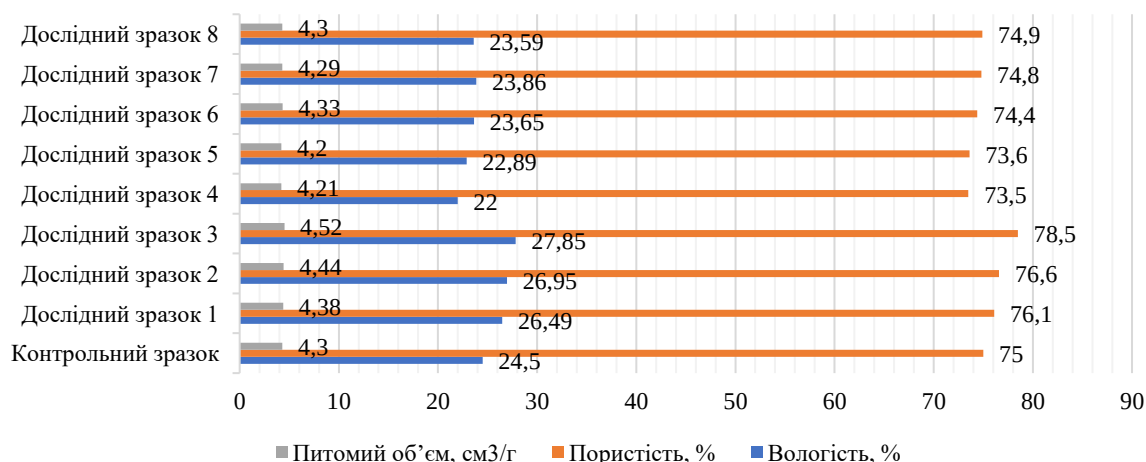


Рис. 2. Результат дослідження впливу натуральних цукрозамінників на якісні показники готових бісквітів

Джерело: розроблено авторами.

Бісквіти з еритритом мають світлішу поверхню, що обумовлено відсутністю процесів карамелізації, у зв'язку з чим їх випікання здійснюють за нижчих температур порівняно з традиційною рецептурою. Додавання інуліну покращує структуру виробів у розрізі, зменшує характерний охолоджувальний ефект еритриту та наближає органолептичні показники бісквітів до зразків на основі сахарози.

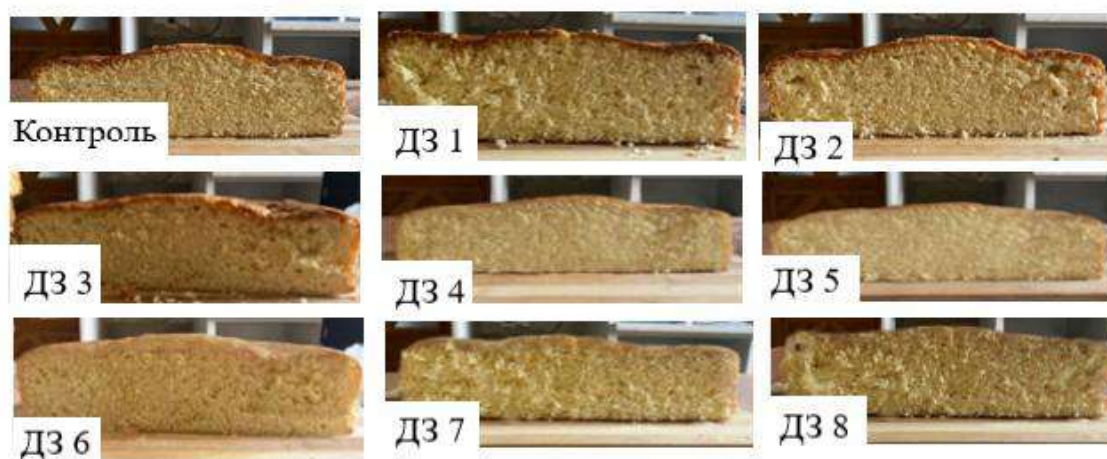


Рис. 3. Зовнішній вигляд дослідних зразків

Джерело: розроблено авторами.

Згідно з чинними нормативними документами, термін зберігання бісквітів без оздоблювальних напівфабрикатів становить 72 години за температури 18 °C та відносної вологості повітря 75 %. За зберігання у картонній тарі цей період подовжується до одного тижня. У промислових умовах термін зберігання може досягати одного місяця, що забезпечується використанням консервантів і розпушувачів, які уповільнюють розвиток мікрофлори та зберігають споживчі властивості продукції.

Таблиця 3 – Органолептична характеристика досліджуваних зразків (контрольного та з інуліном)

| Показник           | Контрольний зразок                                                    | ДЗ 1                                                                  | ДЗ 2                                                                  | ДЗ 3                                                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Зовнішній вигляд   | Форма правильна, без тріщин, відшаровування скоринки та підгоріlostей | Форма правильна, без тріщин, відшаровування скоринки та підгоріlostей | Форма правильна, без тріщин, відшаровування скоринки та підгоріlostей | Форма правильна, без тріщин, з легким темнішим відтінком скоринки, без її відшаровування |
| Поверхня           | Поверхня рівномірно опукла, без деформацій                            | Поверхня рівномірно опукла, без деформацій                            | Поверхня рівномірно опукла, без деформацій                            | Поверхня рівномірно опукла, без деформацій                                               |
| Колір поверхні     | Жовтий                                                                | Жовтуватий, із золотистим відтінком                                   | Золотистий                                                            | Золотистий, з невеликим коричневим відтінком                                             |
| Структура м'якушки | Тонкостінно пориста, м'якушка нелипка                                 | Тонкостінно пориста, м'якушка нелипка                                 | Тонкостінно пориста, м'якушка нелипка                                 | Пористість тонкостінна, м'якушка нелипка                                                 |
| Смак               | Солодкий                                                              | Трохи менш солодкий                                                   | Солодкий                                                              | Солодкий                                                                                 |
| Запах              | Приємний, характерний для бісквітів                                   | Приємний, характерний для бісквітів                                   | Приємний, характерний для бісквітів                                   | Приємний, характерний для бісквітів                                                      |

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 4 – Органолептична характеристика досліджуваних зразків (з еритритом)

| Показник           | Дослідні зразки                                           |                                                                      |                                                           |                                                           |                                                           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                    | ДЗ 4                                                      | ДЗ 5                                                                 | ДЗ 6                                                      | ДЗ 7                                                      | ДЗ 8                                                      |
| Форма              | Рівномірно опукла, без істотних деформацій                | Рівномірно опукла, без істотних деформацій                           | Рівномірно опукла, без істотних деформацій                | Рівномірно опукла, без істотних деформацій                | Рівномірно опукла, без істотних деформацій                |
| Запах              | Виразний, без сторонніх домішок                           | Виразний, без сторонніх домішок                                      | Виразний, без сторонніх домішок                           | Виразний, без сторонніх домішок                           | Виразний, без сторонніх домішок                           |
| Смак               | Солодкий, характерний для бісквіту                        | Недостатньо солодкий, відчувається невеликий прохолоджувальний ефект | Солодкий, без стороннього присмаку                        | Солодкий, характерний для бісквіту                        | Солодкий, характерний для бісквіту                        |
| Поверхня           | Рівномірна, світло-жовта, без підгоріlostей               | Рівномірна, світло жовта, без підгоріlostей                          | Золотисто-світло коричнева, без підгоріlostей             | Золотисто-світло-коричнева, без підгоріlostей             | Золотисто-світло-коричнева, без підгоріlostей             |
| Структура м'якушки | Пористість добре розвинена, тонкостинна, м'якушка нелипка | Пористість гірше розвинена, товстостинна, м'якушка нелипка           | Пористість добре розвинена, тонкостинна, м'якушка нелипка | Пористість добре розвинена, тонкостинна, м'якушка нелипка | Пористість добре розвинена, тонкостинна, м'якушка нелипка |

Джерело: розроблено авторами.

Результати дегустаційної оцінки дослідних зразків методом бальної оцінки за 5-бальною системою представлено на рис. 4. Найліпшими виявились зразки 3, 6, 7, 8.

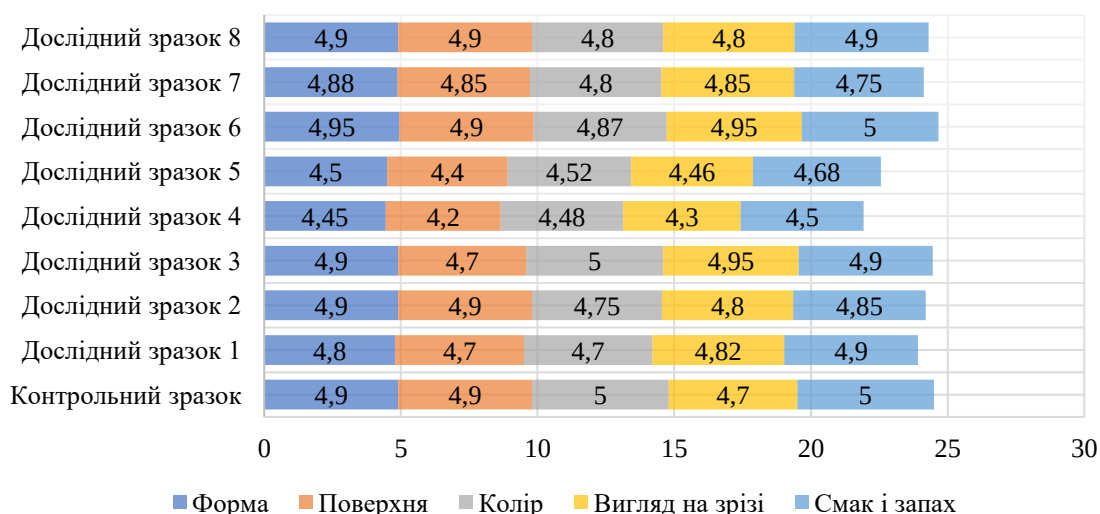


Рис. 4. Гістограма результатів дегустаційної оцінки дослідних зразків

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження змін якісних показників у процесі зберігання проводили з урахуванням динаміки вологості готових виробів (рис. 5). Встановлено, що вологість контрольного зразка протягом трьох діб зменшується на 6,72 %. Для бісквітних напівфабрикатів з інуліном втрата води є значно меншою, що пояснюється підвищенням вологоутримуючої здатності виробів за рахунок зменшення ретроградації крохмального клейстеру та уповільнення процесів черствіння.

Найінтенсивніше зниження вологості спостерігалось у зразках з еритритом та композицією «еритрит – стевія». Водночас поєднання цих підсолоджувачів з інуліном забезпечувало повільнішу втрату води, наближаючи її значення до контрольного рівня. Отже, введення інуліну позитивно впливає на збереження якості бісквітних виробів у процесі зберігання.

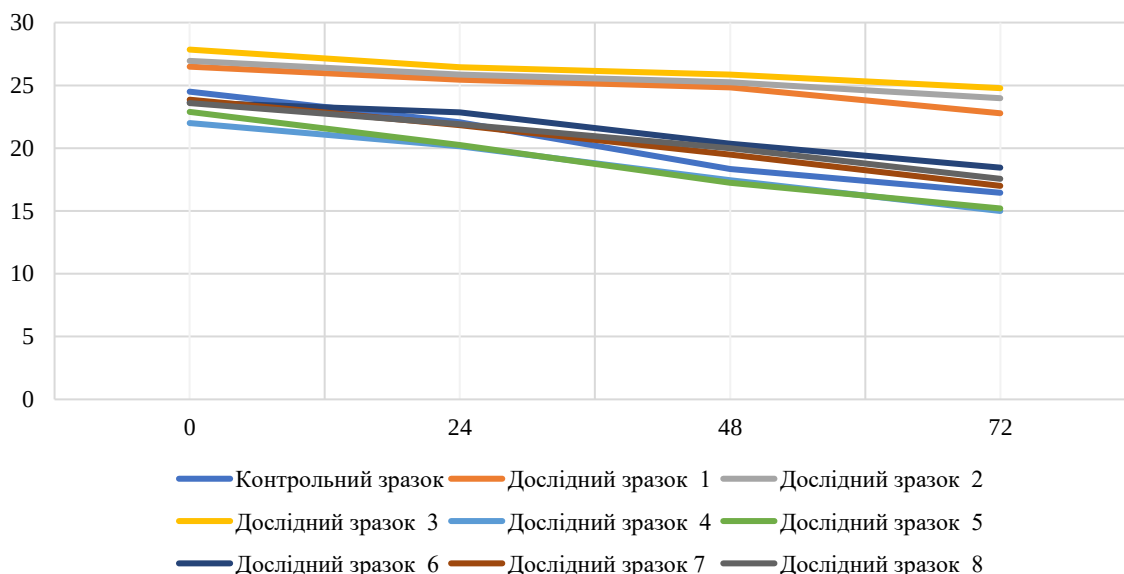


Рис. 5. Зміна вологості розроблених бісквітних виробів під час зберігання (0...72 год.), %.

Джерело: розроблено авторами.

Комплексний аналіз фізико-хімічних та органолептичних показників показав, що найкращими властивостями, у тому числі за умов зберігання, характеризувалися дослідні зразки 6-8, які містили інулін та композицію еритриту зі стевією. Еритрит забезпечує формування необхідного об'єму та структури виробів, однак у високих концентраціях спричиняє сухість і виражений охолоджувальний ефект. Стевія, маючи нульову енергетичну цінність, забезпечує високу солодкість за мінімального дозування, а в комбінації з еритритом формує смаковий профіль, близький до сахарози, тоді як її самостійне використання може зумовлювати лакричний присмак. Інулін, як джерело харчових волокон, підвищує вологоутримуючу здатність, сприяє збереженню м'якості бісквіта, збільшує пористість та компенсує сухість, властиву еритриту.

Відповідно до методики [12] розраховано енергетичну цінність дослідних зразків з урахуванням коефіцієнтів засвоєння білків, жирів і вуглеводів, а також втрат під час теплової обробки (табл. 5). Вміст білків у контрольному та експериментальних зразках суттєво не відрізнявся і становив 9,98...10,72 г, з максимальним значенням у зразку 8. Кількість жирів також змінювалася незначно. Завдяки зменшенню частки засвоюваних вуглеводів енергетична цінність зразка 8 знизилася на 42,27 % порівняно з контролем.

Крім того, встановлено, що розроблений виріб характеризується підвищеним вмістом харчових волокон (2,99 г проти 0,05 г у контрольному зразку) за рахунок введення інуліну. Розрахунок глікемічного показника за методикою [13] засвідчив, що зразок 8 має найнижче значення, зменшення якого становить 41,43 %, що дозволяє рекомендувати його рецептуру до промислового виробництва.

Таблиця 5 – Поживна та енергетична цінність дослідних зразків

| Показники                                        | Контрольний зразок | ДЗ 1   | ДЗ 2   | ДЗ 3   | ДЗ 4   | ДЗ 5   | ДЗ 6   | ДЗ 7   | ДЗ 8   |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Вміст білків, г/ 100 г продукту                  | 10,25              | 10,19  | 10,14  | 9,99   | 10,25  | 10,25  | 9,99   | 10,69  | 10,72  |
| Вміст жирів, г/ 100 г продукту                   | 6,96               | 6,96   | 6,96   | 6,93   | 6,96   | 6,96   | 6,93   | 7,01   | 7,01   |
| Вміст вуглеводів, г/ 100 г продукту              | 59,93              | 59,58  | 59,60  | 58,27  | 25,30  | 25,30  | 23,64  | 22,90  | 23,08  |
| ЕЦ, ккал / 100 г продукту                        | 343,40             | 341,69 | 341,56 | 335,44 | 204,88 | 204,88 | 196,92 | 197,47 | 198,32 |
| ЕЦ втрати теплову обробку, ккал / 100 г продукту | 311,84             | 310,28 | 310,15 | 304,58 | 185,79 | 185,79 | 178,52 | 179,09 | 179,86 |
| ЕЦ засвоєння, ккал / 100 г продукту              | 292,96             | 291,49 | 291,39 | 286,13 | 172,45 | 172,45 | 165,62 | 165,86 | 166,59 |

Джерело: розроблено авторами.

Розрахований показник глікемічності для контрольного зразка складає 38,5, а для зразка 8 (з комплексом всіх трьох цукрозамінників) складає 15,95. Таким чином, заміна сахарози на екологічні натуральні цукрозамінники – еритрит, стевію та інулін дає змогу створити бісквітні напівфабрикати зі зниженою калорійністю та глікемічністю (понад 25 %). Хоча використання цукрозамінників підвищує собівартість продукції порівняно з традиційними рецептурами, соціальний ефект від виробництва функціональних виробів компенсує цей недолік.

**Висновки.** За результатами досліджень встановлено, що еритрит забезпечує найвищу піноутворювальну здатність порівняно із сахарозою, проте знижує стабільність піни. Введення інуліну в кількості 10 % до маси борошна дозволяє підвищити піноздатність та покращити структурно-механічні, фізико-хімічні й органолептичні показники тіста та готових виробів. Найбільш ефективною визначено композицію еритриту, стевії та інуліну. Енергетична цінність оптимального зразка становить 198 ккал проти 342 ккал у контролі, а глікемічність знижена на 41,43 %. Розроблений бісквітний напівфабрикат може бути віднесений до продуктів із редукованою калорійністю та глікемічністю.

#### Список використаних джерел

1. Дорохович, В. В. (2010). Розроблення технологій борошняних кондитерських виробів спеціального призначення. *Харчова наука і технологія*, (1), 82–85.
2. Сирохман, І. В., & Лозова, Т. М. (2008). Наукові спрямування у поліпшенні споживних властивостей та якості борошняних кондитерських виробів. *Наукові праці НУХТ*, (25), 40–43.
3. Дорохович, В. В., & Гуліч, М. П. (2007). Солодкі речовини – цукрозамінники: обґрунтування доцільності використання їх при виробництві борошняних кондитерських виробів. *Гігієна населених місць*, (50), 273–279.
4. Дорохович, В. В., & Абрамова, А. Г. (2013). Використання цукрозамінників нового покоління в технології бісквітів спеціального призначення. *Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій*, 1(44), 153–157.
5. Dorokhovich, V. (2017). Innovative technologies of low-calorie pastry. *Scientific Works of NUFT*, 23(4), 199–206. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2017-23-4-26>.
6. Król, K., Ponder, A., & Gantner, M. (2019). The effect of sugar substitutes on selected characteristics of shortcrust pastry. *Acta Innovations*, (31), 57–63. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.31.6>.
7. Gökçe, C. (2023). The use of carob flour and stevia as sugar substitutes in sponge cake: optimization for reducing sugar and wheat flour in cake formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, Article 100732. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100732>.



8. Буяльська, Н. П., Ткаченко, Ю. Д., & Денисова, Н. М. (2018). Використання продуктів переробки цикорію коренеплідного в технології виробництва борошняних кондитерських виробів. *Технічні науки та технології*, (2), 196–203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-196-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-196-203).
9. Struck, S., Jaros, D., Brennan, C. S., & Rohm, H. (2014). Sugar replacement in sweetened bakery goods. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(9), 1963–1976. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12617>.
10. Радченко, А. Е., & Юрченко, С. Л. (2021). Дослідження впливу еламіну та стевіозиду на в'язкість бісквітних напівфабрикатів. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*, (1), 177–187.
11. Petrova, O., Shevchuk, N., Ziuzko, A., & Barkar, Ye. (2024). Innovative technologies for the creation of low-calorie dairy products using plant components. *Animal Science and Food Technology*, 15(1), 92–108.
12. Буяльська, Н. П., & Денисова, Н. М. (2022). *Основи фізіології та гігієни харчування: Методичні вказівки до самостійної роботи*. НУ «Чернігівська політехніка».
13. Дорохович, А. М. та ін. (2009). *Спосіб визначення показника глікемічності харчового продукту* (Патент України № 40623). Державний реєстр патентів України.

### References

1. Dorokhovych V. V. (2010). Rozroblennia tekhnolohii boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv spetsialnoho pryznachennia [Development of technologies for flour confectionery products for special purposes]. *Kharchova nauka i tekhnolohiia – Food Science and Technology*, 1(10), 82–85.
2. Syrokhman I. V., & Lozova T. M. (2008). Naukovi spriamuvannia u polipshenni spozhyvnykh vlastyvostei ta yakosti boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv [Scientific directions in improving consumer properties and quality of flour confectionery products]. *Nauk. pratsi NUKhT – Scientific Works of National University of Food Technologies*, 25, 40–43.
3. Dorokhovych V. V., & Hulich M. P. Solodki rechovyny – tsukrozaminnyky: obhruntuvannia dotsilnosti vykorystannia yikh pry vyrobnytstvi boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv [Sweeteners – sugar substitutes: rationale for their use in the production of flour confectionery products]. *Hihiiena naselenykh mist – Hygiene of populated places*, 50, 273–279.
4. Dorokhovych V. V., & Abramova A. H. (2013). Vykorystannia tsukrozaminnykiv novoho pokolinnia v tekhnolohii biskvitiv spetsialnoho pryznachennia [Using next-generation sugar substitutes in technology of sponge cake for special purposes]. *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii – Scientific works of Odesa National Academy of Food Technologies*, 1(44), 153–157.
5. Dorokhovych V. (2017). Innovative technologies of low-calorie pastry. *Scientific Works of NUFT*, 23(4), 199–206. <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2017-23-4-26>.
6. Król K., Ponder A., & Gantner M. (2019). The effect of sugar substitutes on selected characteristics of shortcrust pastry. *Acta Innovations*, 31, 57–63. <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.31.6>.
7. Gökçe C. (2023). The use of carob flour and stevia as sugar substitutes in sponge cake: optimization for reducing sugar and wheat flour in cake formulation. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 32, Article 100732. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100732>.
8. Buialska N. P., Tkachenko Yu. D., & Denysova N. M. (2018). Vykorystannia produktiv pererobky tsykoriu koreneplidnoho v tekhnolohii vyrobnytstva boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv [Use of the root chicory processing products in the production technology of flour confectionery products]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 2(12), 196–203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-196-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-196-203).
9. Struck S., Jaros D., Brennan Ch. S., & Rohm H. (2014). Sugar replacement in sweetened bakery goods. *International Journal of Food Science and Technology*, 49, 1963–1976. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12617>.
10. Radchenko A. E., & Iurchenko S. L. (2021). Doslidzhennia vplyvu elaminu ta steviozydu na viazkist biskvitnykh napivfabrykativ [Study of elamine and stevioside effect on the viscosity of sponge semi-finished products]. *Prohresyvnii tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli – Progressive equipment and technologies for food production, restaurant industry and trade*, 1(33), 177–187.

11. Petrova O., Shevchuk N., Ziuzko A., & Barkar Ye. (2024). Innovative technologies for the creation of low-calorie dairy products using plant components. *Animal Science and Food Technology*, 16(1), 92–108.

12. Buialska N. P., & Denysova N. M. (2022). Osnovy fiziologii ta hihieny kharchuvannia: metod. vказivky do samost. roboty dlia zdobuvachiv vyshch. osvity pershoho (bakalavr.) rivnia spets. 181 “Kharchovi tekhnologii” [Fundamentals of Physiology and Hygiene of Food: Guidelines for Independent Study for Applicants for First-Level (Bachelor’s) Degrees in Specialty 181 “Food Technology”]. Chernihiv National Polytechnic University.

13. Dorokhovych A. M., Kovbasa V. M., Hulich M. P., Dorokhovych V. V., & Yaremenko O. M. Sposib vyznachennia pokaznyka hlikemichnosti kharchovoho produktu [Method for determining the glycemic index of a food product]. (Ukraine Pat. 40623, MPK A 23 L 1/10). Ukrainian National Office for Intellectual Property and Innovation. <https://dspace.nuft.edu.ua/items/4da06ad4-71f8-4aca-8014-0614ddde3b10>.

Дата першого надходження статті до видання: 18.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.12.2025

UDC 664.681.2

**Nataliia Buialska<sup>1</sup>, Natalya Denisova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [buialska@gmail.com](mailto:buialska@gmail.com). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6800-5604>. ResearcherID: G-2935-2014

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Food Technology and Ecology Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: [4386793@gmail.com](mailto:4386793@gmail.com). ORCID: [orcid.org/0009-0006-5967-2815](http://orcid.org/0009-0006-5967-2815). ResearcherID: JFS-1548-2023

## REDUCING THE GLYCEMIC RATE OF SPONGE CAKE PRODUCTS THROUGH THE USE OF ECOLOGICALLY SAFE SUGAR SUBSTITUTES OF PLANT ORIGIN

*Excess sugar in foods can have adverse effects on human health. Therefore, it's important to develop food products with a low glycemic index. This is especially true for baked products, which are a daily part of the diet of many people not only in Ukraine but also in other countries.*

*The use of sugar substitutes is one of the most widely known methods for lowering the glycemic index of foods. Natural sugar substitutes should be considered the most ecologically safe. However, their use in the production of various baked products requires further research.*

*An analysis of research and publications has shown that, to date, insufficient attention has been paid to issues related to the use of erythritol, inulin and stevia in the formulation of sponge cake products to reduce their glycemic content.*

*The aim of the study was to analyze the possibility of reducing the glycemic index of semi-finished sponge cake products by replacing sucrose with a combination of natural sugar substitutes, such as erythritol, inulin, and stevia, while maintaining the quality of the products.*

*The feasibility of using erythritol, inulin, and stevia in sponge cake recipes to reduce their glycemic index is substantiated in the article. The influence of these ingredients on the glycemic response, as well as the structural, mechanical, and organoleptic properties of finished products, are established. The combined effect of erythritol and inulin on the rheological properties of sponge cake dough and the quality of finished products is studied.*

*Optimal ratios of sugar substitutes that reduce the glycemic index without degrading the consumer properties of sponge cake products are substantiated. New experimental data on the effect of inulin as a functional ingredient on the texture, water-binding capacity, and nutritional value of low-glycemic sponge cake products were obtained. The possibility of producing functional sponge cake products using erythritol, stevia extract, and inulin, suitable for consumption by individuals with carbohydrate metabolism disorders and those committed to a healthy diet, was proven.*

**Keywords:** semi-finished sponge cake product; sugar substitutes; glycemic index; erythritol; inulin; stevia.

Table: 5. Fig. 5. References: 13.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-314-324](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-314-324)

УДК 666.1.056:539.233

**Наталія Василівна Жданюк**кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології кераміки та скла  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)E-mail: [zhdanyuk.nataliya@kpi.ua](mailto:zhdanyuk.nataliya@kpi.ua), ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3771-5045>

Scopus ID: 57201323575, ResearcherID: AAK-4541-2020

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НАТРІЙ-КАЛЬЦІЙ-СИЛІКАТНОГО СКЛА, ЗМІЦНЕНОГО ІОНООБМІННИМ МЕТОДОМ

У роботі досліджено вплив умов іонно-обмінного зміцнення натрій-кальцій-силікатного флоат-скла на його механічні властивості. Зміцнення проводили у розплаві  $KNO_3$  за температур 350–475 °C протягом 0–6 годин. Визначено залежності приросту маси зразків від температури та часу витримки, що підтверджує дифузійний характер процесу. Механічні властивості оцінювали за показниками мікротвердості та міцності на згин. Встановлено, що обробка при 475 °C протягом 6 годин забезпечує підвищення міцності на згин приблизно у 2,5 раза та зростання мікротвердості на 10–12 % порівняно з необробленим склом.

**Ключові слова:** флоат-скло; іонно-обмінне зміцнення; міцність на вигин; мікротвердість, Air-/Tip-поверхня.

Рис.: 9. Бібл.: 15.

**Актуальність теми дослідження.** Скло – це унікальний матеріал, який характеризується прозорістю, хімічною та термічною стійкістю, твердістю. Залежно від хімічного складу, умов синтезу, технології формування та додаткової механічної та фізико-хімічної обробки можна отримати скло спеціальними властивостями. Єдиним «слабким місцем» скла є його крихкість. У сучасних технологічних процесах застосовують додаткові методи обробки поверхні скла, що дозволяє суттєво підвищити його міцність. Тому вивчення процесів зміцнення скла та визначення оптимальних умов іонообмінної обробки скла є актуальним завданням.

**Постановка проблеми.** Механічна міцність скла визначається насамперед структурою матеріалу та наявністю дефектів. До структурних факторів відносяться: ступінь зв'язаності кремнекисневого каркасу, координаційний стан і валентність катіонів, ступінь поляризації іонів, компактність упакування іонів у структурі, а також хімічна і фізична однорідність скла. До факторів, що знижують міцність скла, обумовлену дефектами потрібно віднести стан поверхні та наявність тріщин та подряпин. Крім того, міцність скла також залежить від хімічного складу. Наприклад, міцність поверхні натрій-кальцій-силікатного скла й алюмосилікатного скла, відрізняються у 2-3 рази. Такі фактори, як розмір виробу, технологія виробництва, умови проведення випробувань (температура, вологість, швидкість та тривалість навантаження) та вид деформації теж суттєво впливають на його міцність.

При розробці технологічних процесів зміцнення поверхні листового флоат-скла неодмінно постає задача вибору оптимального температурного режиму та часу обробки зразків. А також прогнозування механічних властивостей скла.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питанням зміцнення натрій-кальцій-силікатного скла присвячено достатня кількість наукових праць [1-12]. Зокрема, досліджено вплив дефектів поверхні скла на його міцність. Практична міцність стекол на згин не перевищує 1 % теоретично розрахованої міцності [1]. Саме статистичний характер міцності крихких матеріалів є основною причиною значного розкиду значень міцності навіть для зразків, виготовлених з однієї партії скла. Це пояснюється наявністю на поверхні та бокових краях мікротріщин (дефекти Гріффіта). Вони утворюються під час виробництва, транспортування, різання, шліфування та полірування. Тріщини є концентраторами напружень. При зовнішньому навантаженні на неї напруження може перевищити теоретичну міцність матеріалу, спричиняючи швидкому поширенню тріщини та руйнування зразка [2].

Підвищення міцності скла здійснюють шляхом загартування, іонного обміну, нанесення на поверхню шару скла з меншим коефіцієнтом теплового розширення, ніж



основне скло, кристалізації поверхневого шару та ін. Модифікація поверхні скла є ключовим напрямком для покращення його експлуатаційних характеристик та протидії деградації під впливом атмосферних чинників. Формування захисного шару на поверхні скла здатне підвищити його міцність та хімічну стійкість [3-5].

В основі іонно-обмінного методу зміцнення скла лежить процес обміну лужними іонами між скляною поверхнею і розплавом солі при температурах нижче температури трансформації скла ( $T_g$ ). Для натрій-кальцій-силікатного скла суть методу зводиться до заміни іона меншого радіуса  $\text{Na}^+$  (0,098 нм) у поверхневому шарі скла, початково присутнього у склі на більший іон  $\text{K}^+$  (0,133 нм) із зовнішнього джерела [6]. Процес іонного обміну проходить реакції:  $\{\text{Si-O}^-\text{Na}^+\} + \text{K}^+ \rightarrow \{\text{Si-O}^-\text{K}^+\} + \text{Na}^+$ .

Коли більший іон знаходиться в поверхневому шарі, він викликає залишкові стискальні напруження на поверхні скла, які ущільнюють наявні дефекти та не дають розвиватися тріщинам (рис. 1).

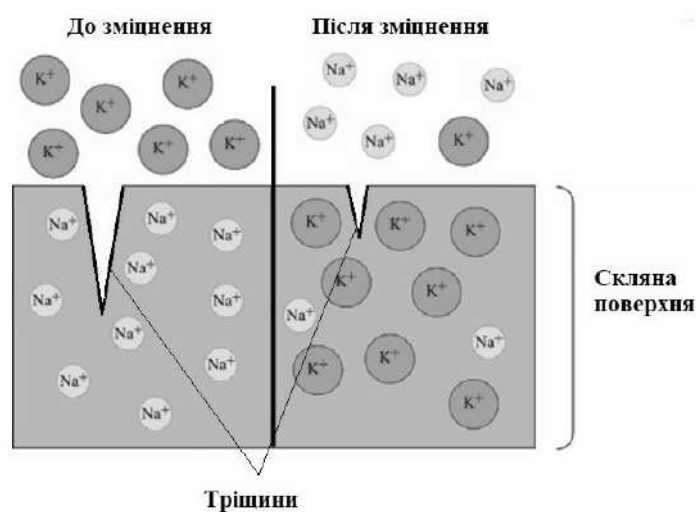


Рис. 1. Схема іонно-обмінної модифікації скла

Джерело: розроблено авторами.

Цей метод не викликає деформації виробу і забезпечує високу оптичну прозорість, що дозволяє його використовувати для зміцнення стекол спеціального призначення [7-9]. Оскільки іонний обмін є процесом, оснований на дифузії, він залежить від температури та часу, очевидно, що ці фактори будуть ключовими в розробці технології зміцнення. У роботі [10] вивчено процес іонного обміну та встановлено, що максимальні значення міцності отримано при 435 °C протягом 8 год. Міцності скла збільшилася в 4,4 раза порівняно з необробленим склом. Максимальне значення мікротвердості досягнуте при 435 °C протягом 12 годин на  $\text{TiO}_2$ -поверхні та становила 8,25 ГПа, що на 18% більше порівняно з необробленим склом. Стійкість до розтріскування хімічно загартованих стекол показала зростання в діапазоні 410–1290 % та 241–1895 % для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -поверхні та  $\text{TiO}_2$ -поверхні, відповідно. СЕМ-ЕДС-аналіз підтвердив, що концентрація іонів калію на поверхні скла та глибина дифузії збільшуються з підвищенням температури та часу витримки.

У роботі [11] вивчено вплив попереднього очищення поверхні содово-кальцій-силікатного флоат-скла перед хімічним зміцненням, що дозволило підвищити поверхневу концентрацію іонів калію у порівнянні з неочищеними зразками. Оптимальними умовами на дво-вісний згин типу «кільце на кільце» визначено іонний обмін у ванні з розплавленим  $\text{KNO}_3$  протягом 8 годин при температурі 450°C з попереднім очищенням кислими розчинами.

У роботі [1] було досліджено іонообмінне зміцнення скла при температурах близьких до  $T_g$ . Доведено, що зразки, оброблені при 520°C протягом короткого періоду 2 год,

показують кращі механічні властивості порівняно зі зразками, обробленими при 480 °C протягом довшого часу, але витравлення зразка протягом довшого часу призводить до зниження міцності, що пояснюється релаксацією напружень. Твердість скла, за Віккерсом, для зразка, обробленого при 480 °C протягом 60 годин, досягли міцності 8,0 ГПа, а для зразка обробленого при 520 °C протягом 2 годин мікротвердість зросла до 9,1 ГПа. Мікротвердість відпаленого скла дорівнювала 6,3 ГПа.

Ще одним способом визначення міцності скла є тріщиностійкість. У роботі [12] розглянуто тріщиностійкість зразків стекол та встановлено, що іонно-обмінне зміцнення скла за температур 400–450 °C та тривалості 12–24 год забезпечує активне дифузійне проникнення іонів калію в поверхню скла, формуючи глибший зміцнений шар, що сприяє підвищенню опору утворенню тріщин та зниженню швидкості їх розповсюдження.

У роботі [13] розглянуто новий перспективний підхід до іонного обміну, де застосовувалася технологія безперервного хімічного зміцнення, що передбачає розпилення розплаву  $\text{KNO}_3$  на скло за температури близької до  $T_g$ . Такий метод зміцнення є більш придатним для безперервного виробництва. Автори стверджують, що найвищі стискуючі напруження та найбільш рівномірний розподіл іонів  $\text{K}^+$  досягаються в діапазоні близькому до  $T_g$ . При температурах  $T_g + 50$  °C напруження зменшуються через релаксаційні процеси, тоді як при  $T_g - 50$  °C недостатня рухомість іонів калію обмежує глибину зміцнення. Оптимальним режимом для зміцнення склотари методом напилення є температура, що відповідає точці деформації, за якої забезпечується найкраще співвідношення між глибиною зміцнення, рівнем стискальних напружень та механічною стабільністю зразків. Враховуючи, що під час опилення скляних виробів використовується менша кількість солі порівняно з методом занурення, використання температури напилення близької до температури трансформації є цілком обґрунтованим [14; 15].

Дослідження підтверджують, що метод іонного обміну є ефективним для зміцнення виробів із листового скла тонких номіналів, виробів складної геометрії будь-яких розмірів, а також для зміцнення склокристалічних матеріалів. Також на сьогодні розробляються технології нанесення покриття на гарячому кінці методом розпилення розплаву солі  $\text{KNO}_3$ .

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вибору параметрів іонного обміну є важливим для розробки технологій зміцнення скла. У науковому розумінні процесів хімічного зміцнення скла методом іонного обміну усе ще залишаються певні відкриті питання та аномалії. Зокрема, процесів зміцнення скла з урахуванням його геометрії, залежності від температури та часу витримки, особливо за температур близьких до  $T_g$ . Тому дослідження процесів зміцнення скла іонообмінним методом, визначення оптимальних умов зміцнення скла є актуальною задачею.

**Метою статті** є дослідження впливу температури та часу обробки іонним обміном натрій-кальцій-силікатного скла у розплаві  $\text{KNO}_3$  на його механічні властивості, зокрема, мікротвердість, міцність на згин та вивчення впливу міцності Air- та Tin-поверхонь вихідного скла та механічно обробленого скла.

**Техніка та методи експериментальних досліджень.** Матеріали та реактиви: Для досліджень використане комерційне листове флоат-г скло (Pilkington-Glass) у вигляді пластин розмірами: довжина ( $60,0 \pm 1,0$ ) мм, ширина ( $20,0 \pm 0,5$ ) мм, товщина ( $3,0 \pm 0,1$ ) мм.

Для визначення хімічного аналізу скла використано рентгенофлуоресцентний спектрометр Bruker S4 Pioneer.

Теплове розширення зразка та температуру трансформації скла ( $T_g$ ) визначали на вертикальному кварцовому дилатометрі.

Перед іонно-обмінним зміцненням скла очищали розчинами плавикової та сульфатної кислот протягом 3 хвилин.

Для іонообмінного зміцнення скла використано  $\text{KNO}_3$  (Sigma Aldrich), (чистота > 99 %). Зразки скла занурювали у 100 % розплавлену сольову ванну  $\text{KNO}_3$  в електричній муфельній печі за температур (350 °C, 375 °C, 400 °C, 425 °C, 450 °C та 475 °C) протягом 2, 4 та 6 годин.

Попереднє очищення скла відбувається травленням поверхні скла в сумішах плавикової та сірчаної кислот. Зразки скла оброблялися в суміші кислот 5,25н HF і 6н  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при температурі 25°C впродовж 2 хвилин.

Зразки скла попередньо нагрівали протягом 1 години при 300 °C, а потім поміщали в розплавлений розчин солі  $\text{KNO}_3$  у контейнері з нержавіючої сталі. Після іонного обміну зразки поступово охолоджували, промивали та додатково очищали за допомогою ультразвуку.

Збільшення ваги зразків, очищених ультразвуком, до та після процесу іонного обміну вимірювали за допомогою цифрового вагового пристрою з точністю вимірювання 0,0001 г.

Статистичну обробку експериментальних даних по міцності при невеликому об'ємі вибірки ( $n = 10-30$  зразків) звичайно обмежують визначенням середнього значення  $P_{\text{ср}}$ , дисперсії  $S^2$ , середньоквадратичного відхилення  $S$ , коефіцієнта варіації  $V$  і довірчого інтервалу середньої міцності.

У роботі було вивчено показники міцності: міцність на згин, мікротвердість. Межа міцності при вигині  $\sigma_{\text{виг}}$  розраховують за формулою:

$$\delta_{\text{зг}} = \frac{3PL}{2b\delta^2}, \text{ Па,}$$

де  $P$  – руйнівне навантаження, Н;  $L$  – відстань між опорами, м;  $b$  – ширина зразка, м;  $\delta$  – товщина зразка, м.

Мікротвердість  $H$  та твердість за Віккерсом  $HV$  визначали шляхом вдавлювання алмазної піраміди Віккерса при навантаженні на неї відповідно 50 та 100 г за 10 вимірами з використанням приладів ПМТ-3 та розраховували за формулою:

$$H, HV = \frac{1854 P}{a^2},$$

де  $a$  – напівдіагональ відбитка, мкм;  $P$  – навантаження на індентор, г.

Статистична теорія міцності дає можливість розрахувати найбільш ймовірне значення міцності зразка скла, що близько по своїй величині до середніх значень його технічної міцності. А також, визначити розкид експериментально знайдених величин міцності, що характеризує неоднорідність випробуваних зразків скла.

Розподіл ймовірностей безперервної випадкової величини описується функцією Гауса:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}.$$

Математичне очікування випадкової величини –  $a$  (середньоарифметичне значення) розраховували за формулою:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Нормальний розподіл  $\delta$  (середньоквадратичне відхилення) розраховувалася за формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^2},$$

де  $\sigma^2$  – дисперсія; змінна  $x$ , для якої вираховується щільність ймовірності;  $a$  – математичне очікування.

### Результати та обговорення.

Флоат-скло характеризується наявністю рівномірно поширених по всій поверхні напружень.  $T_g = 535$  °C. Хімічний склад зразків наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад зразків необробленого натрій-кальцій-силікатного скла, мас. %

| SiO <sub>2</sub> | Na <sub>2</sub> O | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|------------------|-------------------|-------|------|-----------------|------------------|--------------------------------|
| 69,50            | 16,40             | 10,10 | 3,74 | 0,16            | 0,04             | 0,06                           |

Джерело: розроблено авторами.

У процесі іонного обміну відбувається заміна на поверхні скла іонів Na<sup>+</sup> на K<sup>+</sup> з розплавом KNO<sub>3</sub>. відбулося збільшення маси зразків за рахунок іонного обміну у розплавленій сольовій ванні. Дослідження підтверджують, що вага зразків збільшується із підвищенням температури та збільшенням часу обробки. Також згідно з [12] вимірювання збільшення ваги скла залежно від температури та часу забезпечує швидкий та корисний спосіб визначення постійного коефіцієнта взаємної дифузії. Принцип цього методу базується на зміні ваги у скляних зразках в результаті процесу іонного обміну, оскільки іонна вага калію (39,0983 од.) більша за атомну вагу натрію (22,9897 од.). Після іонного обміну загальну молярну кількість іонів, що надходять, можна розрахувати зі збільшення ваги у скляних зразках та кількості іонів, що надходять, на одиницю площі поверхні цього скла. Таким чином, можна відновити концентраційний профіль глибини, використовуючи значення середньомасового коефіцієнта дифузії та оцінити глибину шару іонного обміну.

Враховуючи, що товщина пластини – 3 мм, враховуємо той факт, що дифузія відбувається на двох поверхнях. Розрахунок збільшення маси зразка при іонному обміні проводили на 100 г скла. У склі відсоток оксиду Na<sub>2</sub>O становить 16,29 %. Тоді у зразку скла масою 100 г вміст Na<sub>2</sub>O – 16,29 г. Маса решти компонентів у склі – 83,71 г. Молекулярна маса Na<sub>2</sub>O – 62. Молекулярна маса K<sub>2</sub>O – 94. При еквівалентному заміщенні Na<sub>2</sub>O на K<sub>2</sub>O маса збільшиться на 24,65 г. Зразок матиме масу 83,71 + 24,65 = 108,36 г. Повне заміщення Na<sup>+</sup> на K<sup>+</sup> у склі призведе до збільшення маси:

$$\Delta m = \frac{108,36 - 100}{100} = 0,0836, \text{ або на } 8,36 \, \%.$$

Приріст маси зразків як функцію температури та часу наведено на рис. 3. Маса зразків скла поступово збільшувалася зі збільшенням температури процесу (рис. 3, а) та часу (рис. 3, б).

Загальне збільшення температури іонного обміну на 25 °C приводить до збільшення приросту близько 0,015-0,076 мг. Швидкість приросту маси зростає за температури вище та 475 °C.

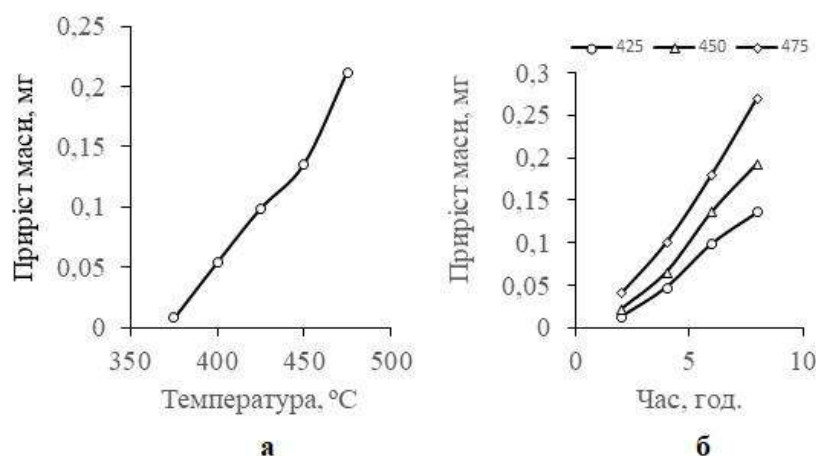


Рис. 3. Збільшення маси зразків скла залежно від температури (а) та часу (б)

Джерело: розроблено авторами.

Результати розрахунку товщини маси модифікованого шару представлено на рис. 4. При цьому нехтуємо дифузією іонів калію через торцеві поверхні, оскільки їх площа незначно мала проти площі поверхні пластин у плані.

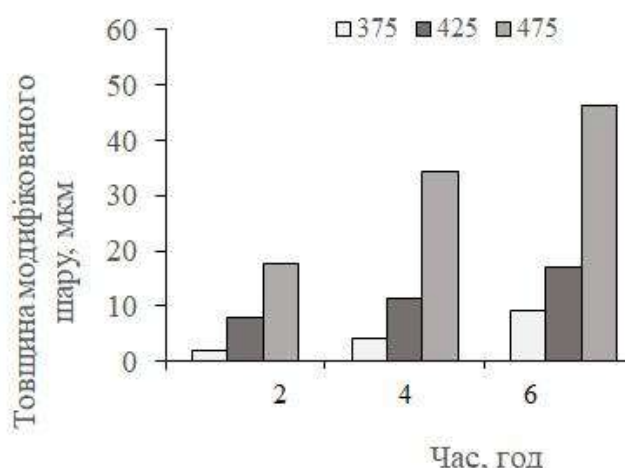


Рис. 4. Розрахована товщина модифікованого шару

Джерело: розроблено авторами.

Було проведено дослідження міцності скла. Руйнування скла може бути викликане достатніми зовнішніми силами, такими як удари, термічне навантаження, або статична втома (корозія під напругою), особливо при наявності поверхневих дефектів (подряпин), що діють як концентратори напружень (дефекти Гріффіта).

Дослідження показали, що міцність флоат-скла відрізняється для сторін, які під час виробництва контактували з газовим середовищем (Air-поверхня) та сторона, що контактувала з розплавленим оловом (Tin-поверхня). Візуально ці сторони ідентифікувати неможливо. Для визначення сторони, що контактували з поверхнею олова, ми використали вимірювальний пристрій Bohle TinCheck BO5164615 (Німеччина), що дозволяє визначати сторону, що контактували з поверхнею олова (Рис. 5).



Рис. 5. Вимірювальний пристрій Bohle TinCheck

Джерело: розроблено авторами.

Мікротвердість вихідного флоат-скла з Air-поверхні та Tin-поверхні було проведено при навантаженнях 50, 75 та 100 г. Результати наведені на рис. 6.

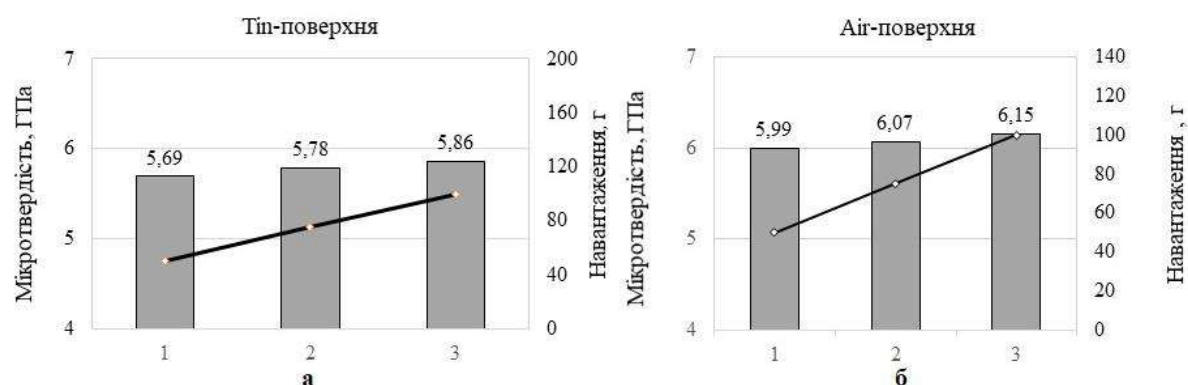


Рис. 6. Мікротвердість флоат-скла:

а – Tin-поверхня; б – Air-поверхня

Джерело: розроблено авторами.

Мікротвердість флоат-скла з боку “газової” сторони. Побічно, про більшу міцність газової сторони свідчить випробування на мікротвердість. Середня мікротвердість для флоат-сторони – 5,75 ГПа, газової сторони – 6,17 ГПа. Зниження міцності Tin-поверхні пояснюється дифузією іонів стануму з розплавленої ванни у поверхневий шар скла. Це призводить до утворення шару оксидів олова та іонів олова у скляній матриці. Це змінює хімічний склад і мікроструктуру тонкого поверхневого шару скла (глибиною 10–50 мкм). В результаті чого Tin-сторона має нижчу хімічну стійкість і вищу схильність до поверхневих дефектів, що призводить до зниження міцності.

Результати досліджень міцності зразків скла на згин з Air-сторони та Tin-сторони. наведені на рис. 7. Середньостатистичне значення для газової сторони – 158 МПа, з флоат-сторони – 55 МПа. Розкрій скла для виготовлення наданих зразків виконувався саме з боку флоат-сторони, що ще більше послабило її міцність. Це пояснюється тим фактом, що різець залишає численні мікрodefekти на торцевих поверхнях, що знижують міцність зразка.

На отриманих зразках нанесли фаску на торцеві поверхні. Після механічної обробки (нанесення фаски на бокові поверхні) зразків показники міцності на вигин для обох сторін зразка були в межах 65÷70 МПа.

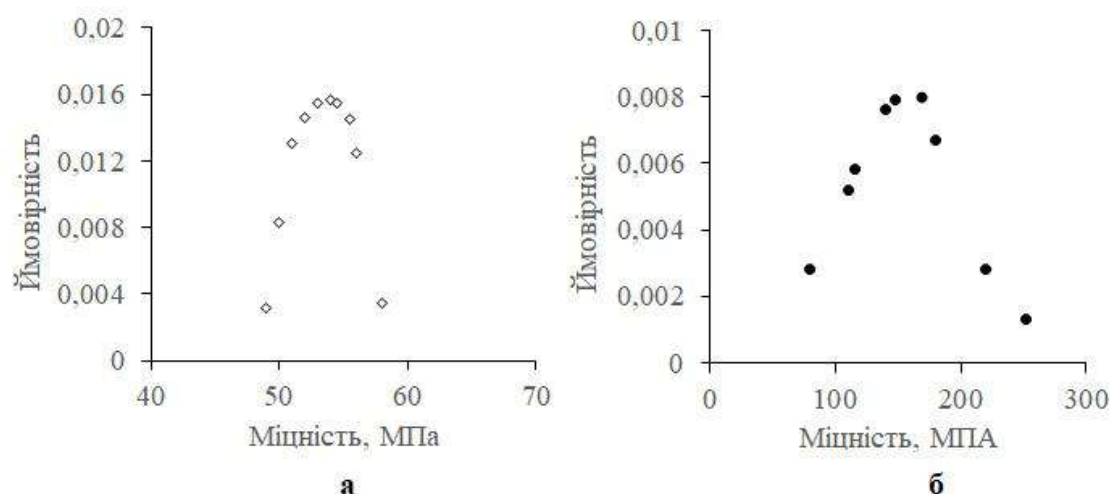


Рис. 7. Розподіл (за Гаусом) показників міцності на вигин вихідного флоат-скла:

а – розтяг з боку Tin-поверхні; б – розтяг з боку Air-поверхні

Джерело: розроблено авторами.



Були проведені пакетні експериментальні дослідження умов іонного обміну для визначення впливу температури та часу обробки на міцність зразків скла. Дослідження мікротвердості зразків скла показали її зростання зі збільшенням часу іонного та підвищенням температури. За температури 475 °С спостерігалось зменшення приросту мікротвердості (рис. 8). Зниження міцності пояснюється поведінкою релаксації напружень стиску у поверхневих шарах скла.

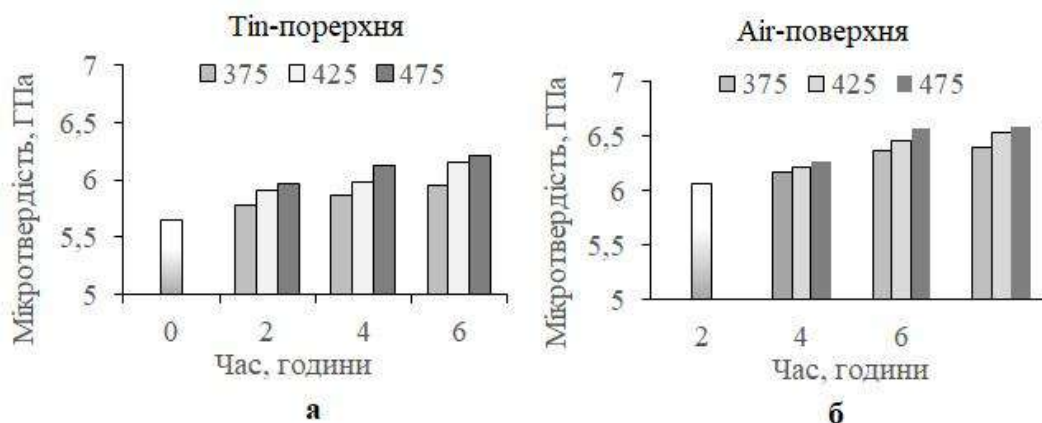


Рис. 8. Вплив температури та часу обробки зразків скла на мікротвердість скла:  
а – з боку Tin-поверхні; б – з боку Air-поверхні

Джерело: розроблено авторами.

Дослідження міцності на згин приведені на рис. 9. Отримані результати показали, що міцність на вигин зростала із збільшенням температури в діапазоні 350–450 °С та збільшенням часу іонного обміну. Зниження приросту міцності на згин зменшилося при температурі 475 °С при іонному обміні протягом 6 годин, у порівнянні з зразком обробленим протягом 6 годин за температури 450 °С. Цей результат можна пояснити початком релаксації напружень за даних умов.

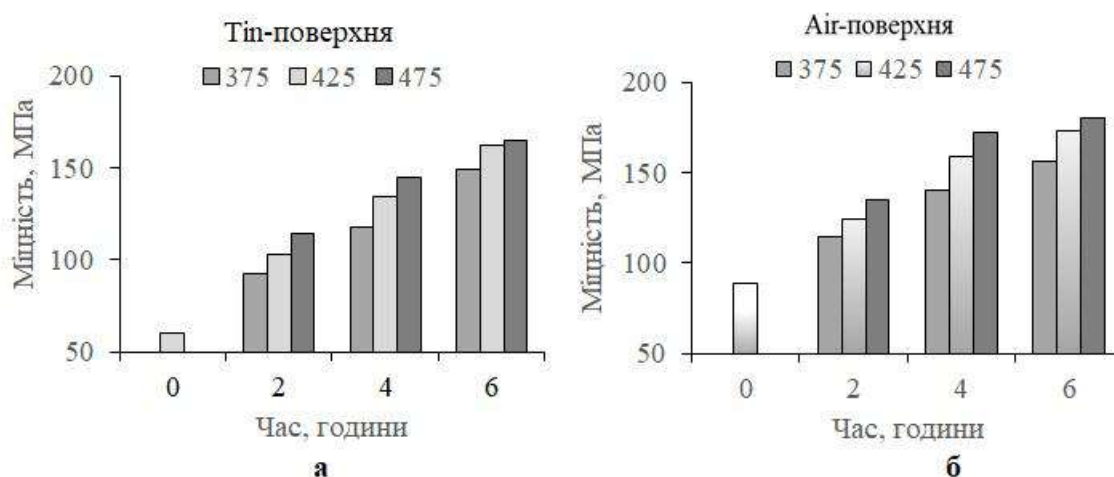


Рис. 9. Вплив температури та часу обробки зразків скла на міцність на згин:  
а – розтяг з боку Tin-поверхні; б – розтяг з боку Air-поверхні

Джерело: розроблено авторами.

Таким чином, підвищення міцності досліджуваних зразків можна пояснити кращим заповненням поверхневих дефектів у склі шляхом іонного обміну та утворенням стискальних напружень у поверхневому шарі. Таке підвищення міцності відслідковується при збільшенні температури та збільшення часу іонного обміну. Іонний обмін на поверхні

скла за температур близьких до  $T_g$  та збільшення часу іонного обміну може призвести до релаксації напружень і, таким чином, зменшує стискальні напруження у поверхневому шарі скла. Таке явище ми спостерігаємо для зразків оброблених за температури 475 °C протягом 6 годин для скляних пластин товщиною 2 мм.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що підвищення міцності флоат-скла скла на вигин та мікротвердість відбувалися завдяки зменшенню кількості поверхневих дефектів, результатом якого стало формування стискальних напружень у поверхневому шарі скла. Глибина модифікованого шару зростає з підвищенням температури та часу обробки й може сягати десятки мкм при іонному обміні за температури 450 °C протягом 6 годин. Досліджено вплив температури та часу обробки іонним обміном натрій-кальцій-силікатного скла у розплаві  $KNO_3$  на його механічні властивості (мікротвердість, міцність на згин) та вивчено вплив міцності  $Air$ - та  $Tin$ -поверхонь вихідного та модифікованого інно-обмінним методом скла. Встановлено, що загальна тенденція зростання міцності спостерігається як на  $Air$ -поверхні, так і на  $Tin$ -поверхні. Отримані результати підтвердили, що для зразків модифікованих при температурі 475 °C протягом 6 годин отримали найвищі показники міцності на згин та мікротвердості, 180 МПа та 6,58 ГПа відповідно. Також, для цих умов спостерігаємо зменшення приросту міцності на вигин та мікротвердості, що свідчить про початок релаксації напружень стиску в поверхневому шарі скла.

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

Під час написання цього матеріалу автори не використовували генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

### **Список використаних джерел**

1. Pisano, G., & Carfagni, G. R. (2017). A micromechanical derivation of the macroscopic strength statistics for pristine or corroded/abraded float glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(13), 4197–4206. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.046>.
2. Долгов, О. М. (2019). *Механіка руйнування*. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка».
3. Koike, A., Akiba, S., Sakagami, T., Hayashi, K., & Ito, S. (2012). Difference of cracking behavior due to Vickers indentation between physically and chemically tempered glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(24), 3438–3444. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.02.020>.
4. Li, X., Jiang, L., Wang, Y., Mohagheghian, I., Dear, J. P., Li, L., & Yan, Y. (2017). Correlation between  $K^+-Na^+$  diffusion coefficient and flexural strength of chemically tempered aluminosilicate glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 471, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.011>.
5. Shcherban, V., Zhdanyuk, N., & Plemnyannikov, M. (2020). Study of the dynamics of stress formation in glass during a thermal hardening. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(56)), 45–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.220535>.
6. Gavalda-Diaz, O., Saiz, E., Chevalier, J., & Bouville, F. (2025). Toughening of ceramics and ceramic composites through microstructure engineering: A review. *International Materials Reviews*, 70(1), 3–30. <https://doi.org/10.1177/09506608241308337>.
7. Karlsson, K. S. R., & Wondraczek, L. (2021). Strengthening of oxide glasses. In *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture* 1, 391–404.
8. Karlsson, S., Jonson, B., & Stalhandske, C. (2010). The technology of chemical glass strengthening – A review. *European Journal of Glass Science and Technology A*, 51(2), 41–54.
9. Xu, G., Zhang, J., He, H., Dong, J., Liu, J., Wang, F., ... Chen, J. (2025). The effect of ion exchange on the properties of  $MgO-Al_2O_3-SiO_2$  transparent glass-ceramics. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.057>.
10. Güzel, A. S., Sarıgül, M., Özdemir Yanık, M. C., Günay, E., Usta, M., & Öztürk, Y. (2019). Enhancing mechanical endurance of chemical-tempered thin soda-lime silicate float glass by ion exchange. *Journal of the Australian Ceramic Society*, Published online. <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00375-x>.



11. Sglavo, V. M., Quaranta, A., Allodi, V., & Mariotto, G. (2014). Analysis of the surface structure of soda lime silicate glass after chemical strengthening in different  $\text{KNO}_3$  salt baths. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 401, 105–109. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.01.026>.
12. Gy, R. (2008). Ion exchange for glass strengthening. *Materials Science and Engineering: B*, 149(2), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.11.029>.
13. Min, K. W., Choi, J. H., Jung, Y., Byun, Y. M., Im, W. B., & Kim, H.-J. (2023). Weibull reliability and mechanical properties of chemical strengthening lightweight glass containers using spray coating. *Processes*, 11(1), 15. <https://doi.org/10.3390/pr11010015>.
14. Kim, S. W., Im, H. T., Lee, J. E., Kim, H. S., Kim, J. H., & Hwang, J. (2021). Physical properties of chemically strengthened thin glass prepared by the spray method using an original  $\text{KNO}_3$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$  slurry. *Materials Chemistry and Physics*, 259, 123942. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123942>.
15. Lee, J. E., Im, H. T., Kim, H. S., Kim, S. W., Kim, J. H., Ryu, B. K., & Hwang, J. (2020). Effect of  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  particle size in a slurry on the physical properties of chemically strengthened thin glass prepared by the spray method. *ACS Omega*, 5(41), 26667–26672. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03518>.

### References

1. Pisano, G., & Carfagni, G. R. (2017). A micromechanical derivation of the macroscopic strength statistics for pristine or corroded/abraded float glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 37(13), 4197–4206. [doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.046](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.046)
2. Dolhov, O. M. (2019). *Mekhanika ruinvannia [Mechanics of destruction]*. NTU «Dniprovska politehnika» – Dnipro: Dnipro Polytechnic National Technical University.
3. Koike, A., Akiba, S., Sakagami, T., Hayashi, K., & Ito, S. (2012). Difference of cracking behavior due to Vickers indentation between physically and chemically tempered glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 358(24), 3438–3444. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.02.020>.
4. Li, X., Jiang, L., Wang, Y., Mohagheghian, I., Dear, J. P., Li, L., & Yan, Y. (2017). Correlation between  $\text{K}^+$ – $\text{Na}^+$  diffusion coefficient and flexural strength of chemically tempered aluminosilicate glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 471, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.05.011>
5. Shcherban, V., Zhdanyuk, N., & Plemnyannikov, M. (2020). Study of the dynamics of stress formation in glass during a thermal hardening. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1(56)), 45–48. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.220535>.
6. Gavalda-Diaz, O., Saiz, E., Chevalier, J., & Bouville, F. (2025). Toughening of ceramics and ceramic composites through microstructure engineering: A review. *International Materials Reviews*, 70(1), 3–30. <https://doi.org/10.1177/09506608241308337>.
7. Karlsson, K. S. R., & Wondraczek, L. (2021). Strengthening of oxide glasses. In *Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture* 1, 391–404.
8. Karlsson, S., Jonson, B., & Stalhandske, C. (2010). The technology of chemical glass strengthening – A review. *European Journal of Glass Science and Technology A*, 51(2), 41–54.
9. Xu, G., Zhang, J., He, H., Dong, J., Liu, J., Wang, F., ... Chen, J. (2025). The effect of ion exchange on the properties of  $\text{MgO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$  transparent glass-ceramics. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.057>.
10. Güzel, A. S., Sarıgüzel, M., Özdemir Yanık, M. C., Günay, E., Usta, M., & Öztürk, Y. (2019). Enhancing mechanical endurance of chemical-tempered thin soda-lime silicate float glass by ion exchange. *Journal of the Australian Ceramic Society*, Published online. <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00375-x>.
11. Sglavo, V. M., Quaranta, A., Allodi, V., & Mariotto, G. (2014). Analysis of the surface structure of soda lime silicate glass after chemical strengthening in different  $\text{KNO}_3$  salt baths. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 401, 105–109. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2014.01.026>.
12. Gy, R. (2008). Ion exchange for glass strengthening. *Materials Science and Engineering: B*, 149(2), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2007.11.029>.
13. Min, K. W., Choi, J. H., Jung, Y., Byun, Y. M., Im, W. B., & Kim, H.-J. (2023). Weibull reliability and mechanical properties of chemical strengthening lightweight glass containers using spray coating. *Processes*, 11(1), 15. <https://doi.org/10.3390/pr11010015>.

14. Kim, S. W., Im, H. T., Lee, J. E., Kim, H. S., Kim, J. H., & Hwang, J. (2021). Physical properties of chemically strengthened thin glass prepared by the spray method using an original  $\text{KNO}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$  slurry. *Materials Chemistry and Physics*, 259, 123942. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123942>.

15. Lee, J. E., Im, H. T., Kim, H. S., Kim, S. W., Kim, J. H., Ryu, B. K., & Hwang, J. (2020). Effect of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  particle size in a slurry on the physical properties of chemically strengthened thin glass prepared by the spray method. *ACS Omega*, 5(41), 26667–26672. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03518>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

УДК 666.1.056:539.233

**Nataliia Zhdaniuk**

PhD in Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Chemical Technology of Ceramics and Glass, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: [zhdanyuk.nataliya@lil.kpi.ua](mailto:zhdanyuk.nataliya@lil.kpi.ua), ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3771-5045>

Scopus ID: 57201323575. ResearcherID: AAK-4541-2020

## RESEARCH ON THE STRENGTH OF SODIUM-CALCIUM-SILICATE GLASS STRENGTHENED BY ION-EXCHANGE METHOD

*This study examines the influence of ion-exchange strengthening parameters on the mechanical properties of soda–lime–silicate float glass. Chemical strengthening was performed in molten  $\text{KNO}_3$  at 350–475 °C for up to 6 hours.*

*During ion exchange, larger  $\text{K}^+$  ions replace smaller  $\text{Na}^+$  ions in the surface layer, generating compressive stresses that reduce the impact of surface flaws and improve the mechanical performance of the glass. The mass gain of samples, measured as a function of temperature and treatment duration, confirmed the diffusion-controlled nature of the process and enabled estimation of the modified surface layer depth. The depth of the modified layer increases with increasing temperature and treatment time and can reach tens of microns when ion-exchanged at 450 °C for 6 hours.*

*Mechanical properties were evaluated using microhardness and flexural strength tests, with statistical analysis based on the Gaussian distribution. The results show that treatment at 475 °C for 6 hours increases flexural strength by approximately 2.5 times and microhardness by 10–12 % relative to untreated glass. Additionally, under these conditions, a decrease in the rates of further flexural strength and microhardness improvement was observed, indicating the onset of compressive stress relaxation in the surface layer of the glass.*

*Differences between the Air and Tin surfaces of float glass were also identified, with the Air side demonstrating higher initial microhardness and strength. Additional mechanical edge processing reduced variability and aligned the strength values of both surfaces.*

*The findings confirm the effectiveness of ion-exchange strengthening and provide guidance for optimizing temperature and duration parameters to improve the durability and performance of float glass.*

**Keywords:** float glass; ion-exchange strengthening; flexural strength; microhardness; Air/Tin surface.

Fig.: 9. References: 15.

**Людмила Миколаївна Пономарьова<sup>1</sup>, Андрій Юрійович Довгополов<sup>2</sup>,  
Володимир Васильович Лупирь<sup>3</sup>,  
Артем Андрійович Лазаренко<sup>4</sup>, Богдан Вадимович Козлов<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри теоретичної та прикладної хімії  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua](mailto:l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1637-3229>

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологія машинобудування верстати та інструменти (ТМБІ)  
Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

<sup>3</sup>генеральний директор

ТОВ Науково-виробнича компанія «Папірус», Суми, Україна

E-mail: [vladimir@vcity.sumy.ua](mailto:vladimir@vcity.sumy.ua)

<sup>4</sup>аспірант кафедри технологія машинобудування, верстати та інструменти

Сумський державний університет (Суми, Україна);

член ГО «Сумський кластер інженерів механіків Індустрія 5.0А» (Суми, Україна)

E-mail: [y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4681-383X>

<sup>5</sup>студент

Сумський державний університет (Суми, Україна)

E-mail: [kozlovbogdan95@gmail.com](mailto:kozlovbogdan95@gmail.com)

## **РОЗРОБКА БЕЗПЕЧНИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ ДИМОВИХ КОМПОЗИЦІЙ: ХІМІЧНИЙ АСПЕКТ ТА ТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА**

У статті виконано аналіз хімічного складу, механізмів реакції та токсичності основних типів піротехнічних димових сумішей. Представлено результати експериментального дослідження сигнальної димової суміші на основі калій нітрату, сахарози та парафіну. Було проведено тестування шести сумішей, в яких змінювали вміст окисника, палива та охолоджувача. Для визначення найкращого співвідношення суміші димового сигналу, спостерігали за виходом диму, часом запалювання та тривалістю горіння. Найкращий результат спостерігався при співвідношенні 37,5 мас.% KNO<sub>3</sub>, 37,5 мас.% сахарози та 25% парафіну з часом запалювання 5 с та тривалістю горіння 90 с з повільною прозорістю кольору та густиною диму.

**Ключові слова:** піротехнічні димові шапки; метал-хлоридні суміші; сигнальний дим; хімічні реакції горіння; токсичність аерозолів; безпека.

**Актуальність теми дослідження.** Піротехнічні димові шапки систематично використовуються з часів Першої світової війни й до цього часу є ефективними засобами на сучасному полі бою та в цивільних застосуваннях. Вони використовуються у військових операціях та навчаннях для зменшення видимості противника, маскуванню об'єктів або сигналізації та позначення позицій; правоохоронними органами для забезпечення безпеки та захисту; цивільним населенням під час святкових, соціальних, культурних, політичних та спортивних заходів [1].

Горіння піротехнічних димів генерує велику кількість аерозольних частинок різної морфології та розміру, які надають диму характерних властивостей: кольору для сигнального диму або маскувальної здатності для темного диму [2-4].

Зв'язок між впливом частинок у повітрі та здоров'ям людини, зокрема з серцево-легеневими захворюваннями, добре задокументований у науковій літературі. Експериментальні дослідження демонструють, що менші частинки викликають сильніший вплив, ніж більші, завдяки більшому співвідношенню площі поверхні до маси. Однак необхідно враховувати також їхній хімічний склад і властивості [1; 5; 6].

**Постановка проблеми.** Військові та цивільні димові речовини, які використовуються для сигналізації та маскуванню, можуть становити ризик для здоров'я через токсичність їхніх компонентів та продуктів горіння. Різні типи диму мають різний рівень токсичності; деякі викликають подразнення дихальних шляхів та мають потенціал довгострокового впливу на організм. Це зумовлює необхідність розробки нових, менш токсичних димових композицій.

**Метою роботи** є аналіз сучасних піротехнічних димових сумішей, виявлення їх переваг та недоліків, розробка та експериментальна перевірка альтернативної сигнальної димової суміші на основі екологічно безпечних компонентів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Піротехнічні димові суміші поділяються на два основні класи: метал-хлоридні та сигнальні (кольорові) суміші [7-11].

Метал-хлоридні суміші використовуються для маскування та утворення густого, непрозорого диму. Ці суміші здатні утворювати стійкі димові завіси протягом тривалого часу. Вони є основним компонентом військового арсеналу багатьох країн, зокрема є основою шашок РДГ-2, ДШ-157, УДШ, які традиційно застосовувались у Збройних Силах України [9].

Сигнальні (кольорові) суміші містять барвники та використовуються для маркування позицій, передачі сигналів та позначення об'єктів. Вони менш потужні за маскувальною дією, але забезпечують яскравий, впізнаваний колір. Основою є антраценові суміші (типи А-12 і А-13), які містять антрацен разом із компонентами-окисниками та інертними речовинами. Основна – повільного горіння (А-12), перехідна – швидкого горіння (А-13). Також, відомий ряд кольорових димових сумішей, в яких основним окисником є Калій хлорат ( $\text{KClO}_3$ ) [10]. Під час горіння утворюється густий білий аерозоль, який фарбують додаванням барвників. Складом суміші та способами її формування регулюють швидкість горіння – оскільки, занадто швидке горіння провокує руйнування барвника або виділяє дим занадто короткочасно або неефективно. Повільне горіння, навпаки, призводить до мінімального виходу диму та має тенденцію до само згасання процесу горіння.

У табл. 1 представлено порівняльну характеристику типових рецептур метал-органічних сумішей, які використовуються у виробництві димових сумішей в Україні, США, Великобританії [9; 11; 12].

*Таблиця 1 – Типові рецептури метал-хлоридних сумішей України, США, Великої Британії, % [9; 11; 12]*

| Компонент                     | Україна                            |                                    | США   | Велика Британія |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|-----------------|
|                               | Основна суміш (повільного горіння) | Перехідна суміш (швидкого горіння) |       |                 |
| Гексахлоретан                 |                                    |                                    | 46,66 | 35–37           |
| Гексахлоретан/гексахлорбензол | 20–25                              | 15–20                              | -     | -               |
| Порошок алюмінію              | 10–15                              | 15–20                              | -     | -               |
| Гранульований алюміній        | -                                  | -                                  | 6,68  | -               |
| Цинк оксид                    | 60-70                              |                                    | 46,66 | 40–42           |
| Цинк                          | -                                  | -                                  | -     | 12              |

Метал-хлоридні суміші складаються з таких основних компонентів [7-14]:

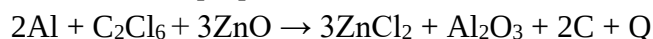
1. Полігалогеновані органічні сполуки – донори хлору: гексахлоретан ( $\text{C}_2\text{Cl}_6$ ) – біла або безбарвна речовина з характерним камфорним запахом та гексахлоробензен ( $\text{C}_6\text{Cl}_6$ ) – альтернативна полігалогенована сполука.

2. Цинк оксид ( $\text{ZnO}$ ) – основний окисник, який забезпечує горіння та утворення хлоридів металів, що формують дим

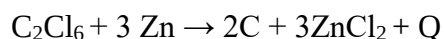
3. Металеве паливо створює необхідну температуру реакції: порошок або гранули алюмінію ( $\text{Al}$ ), рідше, як альтернатива, порошки магнію або цинку.

4. Додаткові компоненти – флегматизатори (парафіни, віск, церезин, вазелін, карбамід) для забезпечення контрольованого, рівномірного горіння, або Кальцій силіцид ( $\text{CaSi}_2$ ) для підвищення температури горіння та його прискорення.

Основні термохімічні реакції, які відбуваються під час горіння метал-хлоридних сумішей можуть бути представлені як [13]:



або з цинком:



Утворений дим метал-хлоридної суміші складається з:

- Цинк хлориду ( $\text{ZnCl}_2$ ) – 62,5 % (основний компонент, відповідальний за видимість диму);
- Цинк оксихлориду ( $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) – 9,6 % (частинки білого кольору, здатні до сублімації);
- 10,8 % хлору ( $\text{Cl}_2$ ) та парів хлор-вмісних сполук (фосгену ( $\text{COCl}_2$ ), хлороводню ( $\text{HCl}$ ), тетрахлорметану ( $\text{CCl}_4$ ), тетрахлоретилену ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ));
- Цинк оксиду ( $\text{ZnO}$ ) – залишки початкових матеріалів;
- слідових кількостей оксидів заліза, алюмінію, свинцю;
- чадного газу ( $\text{CO}$ );
- частинки сажі ( $\text{C}$ ), які надають диму сірого або темного кольору.

Метал-хлоридні димові суміші визнані токсичними та становлять серйозні ризики для здоров'я [13-15]:

- хлороводень ( $\text{HCl}$ ) викликає гостре подразнення дихальних шляхів, опіки слизової оболонки;
- Цинк хлорид під час конденсації викликає термічні ураження легень;
- фосген та хлорорганічні сполуки характеризуються системною токсичністю навіть у слідових кількостях;
- свинець та його сполуки – токсини з довгостроковими ефектами;

Через високу потенційну легеневу токсичність димові гранати на основі цинк хлориду виведені з арсеналу більшості західних країн та замінені на менш токсичні альтернативи. США та інші держави активно розробляють альтернативні композиції без цинку (НХ-композиції) [8].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Альтернативні сигнальні димові суміші – суміші на основі менш токсичних компонентів. Типова рецептура містить: окисник – традиційно калій хлорат або, як альтернатива, калій нітрат; паливо – крохмаль, лактоза або сахароза; охолоджуючий агент або флегматизатор – парафіни, воски; барвники – індиго, антрацен або інші органічні барвники (для специфічних кольорових варіантів) [7; 8; 14; 15]. Основна перевага цих сумішей – значно менша токсичність продуктів горіння та отримання контрольованого температурного режиму, а виробни на основі такої композиції належать до відносно малотоксичних піротехнічних засобів для короткострокового застосування (табл. 2).

Головною потенційною небезпекою є ризик термічних опіків від відкритого полум'я або можливого розбризкування розжареного матеріалу. Також слід пам'ятати, що при неправильному застосуванні, зокрема в закритих приміщеннях, утворений дим може викликати задуху, подразнення дихальних шляхів, кашель, першіння, слюзотечу [16].

Таблиця 2 – Токсикологічні характеристики компонентів суміші на основі Калій нітрату

| Токсичність                                                                                                  | Хронічні ефекти                                       | Статус                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Калій нітрат</b>                                                                                          |                                                       |                                     |
| Низька                                                                                                       | Немає даних про проблеми при нормальному використанні | GRAS (Generally Recognized As Safe) |
| <b>Сахароза</b>                                                                                              |                                                       |                                     |
| Відсутня                                                                                                     | Немає токсичних ефектів                               | Харчова добавка                     |
| <b>Парафін</b>                                                                                               |                                                       |                                     |
| Дуже низька                                                                                                  | Інертна при контакті зі шкірою                        | Безпечна                            |
| <b>Продукти горіння (<math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{H}_2\text{O}</math>, <math>\text{N}_2</math>)</b> |                                                       |                                     |
| Немає                                                                                                        | Природні речовини                                     | Безпечні                            |

**Виклад основного матеріалу.** Основним компонентом сигнальної димової суміші є окисник – Калій нітрат ( $\text{KNO}_3$ ) або калієва селітра – сильний окисник, особливо під час нагрівання. При температурі вище 400 °C розкладається з виділенням кисню:



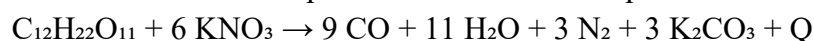
Під час цієї реакції утворюється достатньо тепла для ініціації окиснення парафіну та сахарози, а утворені продукти розпаду (Калій нітрит, Карбон (IV) оксид, азот, вода) є значно менш токсичними порівняно з хлор-органічними продуктами метал-хлоридних сумішей.

Паливом цієї суміші є сахароза ( $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ ), яка інтенсивно згорає у присутності окисника, особливо при нагріванні. При спалюванні утворює основні продукти горіння: Карбон(IV) оксид ( $\text{CO}_2$ ) та воду ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Парафін ( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ ) в цій суміші виконує функцію охолоджувача (може поглинати частину теплової енергії, знижуючи загальну температуру горіння з 1300 °C до 900–1200 °C) та флегматизатора (знижує температуру плавлення та робить суміш більш пластичною). Під час горіння генерує дрібні крапельки та частинки, що формують видимий білий дим, утворює ізолювані органічні фази, які регулюють швидкість реакції.

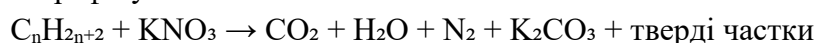
Запропонована композиція (Калій нітрат, сахароза, парафін) утворює керований реакційний матеріал, що робить шашку безпечнішою і активно застосовується в сучасній піротехніці.

Усі процеси можна узагальнити так – цукор і парафін вступають в реакцію з Калій нітратом при нагріванні. Відбувається розклад цукру та парафіну з виділенням газів ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ), твердих частинок ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ), аерозолів та сажі. Суміш димить завдяки конденсації продуктів та неповному згорянню органіки. Хімічні реакції при цьому можна описати наступним чином. Основна реакція окиснення сахарози Калій нітратом:



У реальних умовах неповного горіння продукти можуть містити:  $\text{CO}$  (Карбон(II) оксид),  $\text{H}_2\text{O}$  (водяна пара), газоподібні оксиди  $\text{NO}$  та  $\text{NO}_2$ , тверді частинки ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ )

Окиснення парафіну схематично можна записати як:



При неповному горінні можуть утворюватися: сажа ( $\text{C}$ ) – мікроскопічні чорні частинки; аерозолі органічних сполук; дрібні крапельки рідкого парафіну; незначні кількості  $\text{CO}$  та інших недоокиснених вуглеводнів.

Під час виконання всіх робіт враховували практичні параметри роботи з сумішшю, представлені в табл. 3.

Для приготування суміші всі компоненти перетиралися, зважувалися, з'єднувалися між собою при нагріванні. З суміші м'якої консистенції формували та пресували таблетку масою 10 г. Через 8 годин проводили експериментальні дослідження з горіння.

Таблиця 3 – Практичні параметри роботи з сумішшю

| Процес                                          | Температура, °C |
|-------------------------------------------------|-----------------|
| Плавлення парафіну для утворення пасти          | 50–55           |
| Температура займання парафіну                   | 300             |
| Розклад Калій нітрату (виділення $\text{O}_2$ ) | 400             |
| Температура горіння суміші (оптимум)            | 900–1200        |

**Результати та обговорення.** Випробування проводилися для шести різних складів у трьох випробуваннях, у кожному з яких змінювалися вміст окисника, палива та охолоджувальної рідини. Спостерігалися за виходом диму, часом займання та часом горіння димового сигналу, щоб визначити найкраще співвідношення суміші димового сигналу. Кожен експеримент повторювали по 3 рази і обраховували середнє арифметичне для показників: час займання, с; час горіння, с; маса сухого залишку, г – отримані результати наведені в табл. 4.

Результати демонструють, що найяскравіший білий димовий сигнал спостерігався при співвідношенні 37,5 мас.%  $\text{KNO}_3$ , 37,5 мас.% сахарози та 25 % парафіну з часом займання 5 с та часом горіння 90 с з постійною непрозорістю кольору та густотою диму.

Зафіксовано, що під час горіння такої суміші розвивається температура близько 900–1200 °С, що відмінно корелює з даними наведеними у [17]. Таке співвідношення складу димового сигналу забезпечує найкращу димову вихідну здатність, найменший час займання та найдовший час горіння. Це відбувається через екзотермічну реакцію між калій нітратом як окисником та органічним паливом (сахароза та парафін).

Таблиця 4 – Результати експериментальних досліджень

| Склад димового сигналу, мас.% |          |         | час займання, с | час горіння, с | маса сухого залишку, г |
|-------------------------------|----------|---------|-----------------|----------------|------------------------|
| KNO <sub>3</sub>              | сахароза | парафін |                 |                |                        |
| 30                            | 45       | 25      | 7               | 87             | 0,9951                 |
| 35                            | 40       | 25      | 6               | 85             | 2,7290                 |
| 37,5                          | 37,5     | 25      | 5               | 92             | 1,5314                 |
| 40                            | 35       | 25      | 4               | 80             | 0,9357                 |
| 45                            | 30       | 25      | 3               | 72             | 0,4609                 |
| 47,9                          | 32,9     | 19,2    | 2               | 60             | 1,2365                 |

Отриманий склад був використаний для наповнення димових шашок (рисунок 1), використаних у розробці напівавтоматичної системи аерозольного маскування («Туман-2М»), яка має можливість встановлення на будь-яку техніку, що використовується на полі бою.

Основною перевагою цієї системи є її низька токсичність, невисока собівартість виготовлення, простота конструкції та можливість її встановлення на військову техніку чи будь-який інший транспортний засіб, який використовується військовими протягом однієї доби [18; 19].



Рис. 1 – Димова шашка на основі KNO<sub>3</sub> як один з елементів запропонованої авторами [18; 19] напівавтоматичної системи аерозольного маскування

**Висновок.** У роботі проаналізовано склад димових сумішей. Продемонстровано, що метал-хлоридні димові суміші, які традиційно використовувалися у військовій справі, мають значну загрозу для здоров'я через високу токсичність компонентів та продуктів горіння. Як альтернативу запропоновано використання сахарозо-селітрової суміші з парафіном, яка демонструє прекрасні практичні характеристики (достатній час горіння, якісний дим, контрольованість) при мінімальній токсичності. Безпека такої композиції значно вища за метал-хлоридні аналоги при умові використання на відкритому повітрі та дотримання правил безпеки.

Подальший розвиток дослідження буде полягати в оптимізації складу суміші з барвниками для кольорових варіантів (антрацен, індиго та інші); стандартизації методів виробництва для забезпечення якості готового продукту.

**Подяка.** Дослідження виконано в межах проекту молодих вчених «Розроблення автоматизованого комплексу керування системою димового захисту евакуаційного автотранспорту та мобільних вогневих точок» (ДР № 0124U000538, 2024–2025 рр.), який фінансується Міністерством освіти та науки України. Стаття була підготовлена за технічного сприяння ГО «СКІМ Індустрія 5. ЮА».

**Список використаних джерел**

1. Martin de Lagarde, V., Rogez-Florent, T., Cazier, F., Dewaele, D., Cazier-Dennin, F., & Ollivier, A. (2022). Oxidative potential and in vitro toxicity of particles generated by pyrotechnic smokes in human small airway epithelial cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113637>.
2. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Järvelä, M., & Suhonen, S. et al. (2010). Cytotoxicity and genotoxicity in vitro and irritation potency in vivo of two red phosphorus-based pyrotechnic smokes. *Mutation Research*, 701(2), 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.06.007>.
3. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Hautamäki, M., & Pasanen, A.-L. et al. (2007). In vivo and in vitro evaluation of the acute toxicity, the genotoxicity, and the irritation potency of two hexachloroethane-based pyrotechnic smokes. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70(14), 1167–1181. <https://doi.org/10.1080/15287390701252691>.
4. Koch, E.-C. (2008). Special materials in pyrotechnics: V. Military applications of phosphorus and its compounds. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 33(3), 165–176. <https://doi.org/10.1002/prep.200700212>.
5. Nachman, K. E., & Parker, J. D. (2012). Exposures to fine particulate air pollution and respiratory outcomes in adults using two national datasets: A cross-sectional study. *Environmental Health*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-25>.
6. Oberdörster, G., Oberdörster, E., & Oberdörster, J. (2005). Nanotoxicology: An emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823–839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>.
7. Dilger, J. M., Martin, T. M., Wilkins, B. P., Bohrer, B. C., Thoreson, K. M., & Fedick, P. W. (2022). Detection and toxicity modeling of anthraquinone dyes and chlorinated side products from a colored smoke pyrotechnic reaction. *Chemosphere*, 287(1), 131845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131845>.
8. von Stackelberg, K., Amos, C., Thomas, S., Cropek, D., & MacAllister, B. (2004). *Military smokes and obscurants fate and effects: A literature review relative to threatened and endangered species* (ERDC/CERL TR-04-29). Engineer Research and Development Center, Construction Engineering Research Laboratory.
9. Національний університет цивільного захисту України. Кафедра військової підготовки. (б.р.). *Теоретичні основи застосування аерозолів: Методична розробка щодо проведення групового заняття*. [https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ\\_2\\_17.pdf](https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ_2_17.pdf)
10. Шидловский, А. А. (1973). *Основы пиротехники*. Машиностроение.
11. Ellern, H. (1968). *Military and civilian pyrotechnics*. Chemical Publishing Company.
12. Eaton, J. C., Lopinto, R. J., & Palmer, W. G. (1994). *Health effects of hexachloroethane (HC) smoke* (Technical Report No. 9402). <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA277838.pdf>
13. Loh, C. H., Chang, Y. W., Liou, S. H., Chang, J. H., & Chen, H. I. (2006). *Hexachloroethane smoke inhalation: A rare cause of severe hepatic injuries*. *Environmental Health Perspectives*, 114(5), 763–765. <https://doi.org/10.1289/ehp.8635>
14. Ellern, H. (1968). *Military and civilian pyrotechnics* (Softcover ed.). Chemical Publishing Company.
15. El Idrissi, A., van Berkel, L., Bonekamp, N. E., Dalemans, D. J. Z., & van der Heyden, M. A. G. (2017). The toxicology of zinc chloride smoke producing bombs and screens. *Clinical Toxicology*, 55(3), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15563650.2016.1271125>.
16. Landry, J. (2025, August 22). *Are smoke bombs safe to breathe?* Respiratory Therapy Zone. <https://www.respiratorytherapyzone.com/smoke-bombs-safe-breathe>.
17. Спорягін, Е. О., & Варлан, К. Є. (2011). *Навчальний посібник до вивчення курсу «Фізико-хімічні та експлуатаційні властивості спецматеріалів»*. РВВ ДНУ. <http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/ab59a56fcd58655d53ca0d38ed57b13F-x-ta-eksluat.-vlastiv.-specmaterialiv.pdf>.
18. Довгополов, А. Ю., Некрасов, С. С., Колесник, В. О., Дегтярьов, І. М., & Лупирь, В. В. (2024). Розробка напіваавтоматичної системи аерозольного маскування для не спеціалізованого військового та евакуаційного транспорту. *Методи та прилади контролю якості*, 2, 94–104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104).



19. Довгополов, А. Ю., Колесник, В. О., Некрасов, С. С., Фадєєв, В. М., & Проскурня, С. І. (2025). *Комплекс для постановки комбінованої димової завіси для неспеціалізованого військового транспорту* (Пат. № u202502844). Україна.

### References

1. Violaine Martin de Lagarde, Tiphaine Rogez-Florent, Fabrice Cazier, Dorothée Dewaele, Francine Cazier-Dennin, Alexane Ollivier, et al. (2022). Oxidative potential and in vitro toxicity of particles generated by pyrotechnic smokes in human small airway epithelial cells. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 239, 113637. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113637>.
2. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Järvelä, M., Suhonen, S. et al. (2010). Cytotoxicity and genotoxicity in vitro and irritation potency in vivo of two red phosphorus-based pyrotechnic smokes. *Mutat. Res.*, 701 (2), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2010.06.007>.
3. Hemmilä, M., Hihkiö, M., Kasanen, J.-P., Turunen, M., Hautamäki, M., Pasanen, A.-L., Linnainmaa, K. (2007). In vivo and in vitro evaluation of the acute toxicity, the genotoxicity, and the irritation potency of two hexachloroethane-based pyrotechnic smokes. *J. Toxicol. Environ. Health Part A*, 70(14), 1167-1181, <https://doi.org/10.1080/15287390701252691>.
4. Koch, E.-C. (2008). Special materials in pyrotechnics: V. Military applications of phosphorus and its compounds. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 33(3), 165-176. <https://doi.org/10.1002/prep.200700212>.
5. Nachman, K.E., Parker, J.D. (2012). Exposures to fine particulate air pollution and respiratory outcomes in adults using two national datasets: a cross-sectional study. *Environ. Health*, 11(1), 25. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-25>
6. G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Oberdörster. (2005). Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ. Health Perspect.* 113(7), 823-839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>
7. Jonathan, M. Dilger, Todd, M. Martin, Benjamin, P. Wilkins, Brian, C. Bohrer, Kelly M. Thoreson, Patrick W. Fedick. (2022). Detection and toxicity modeling of anthraquinone dyes and chlorinated side products from a colored smoke pyrotechnic reaction. *Chemosphere*, 287(1), 131845. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131845>.
8. Von Stackleberg, K., Amos, C., Thomas, S., Cropek, D., MacAllister, B. (2004). Military Smokes and Obscurants Fate and Effects: A Literature Review Relative to Threatened and Endangered Species; 2004. ERDC/CERL TR-04-29 IL 61826-9005 Final Report.
9. Natsionalnyi universytet tsyvilnoho zakhystu Ukrainy. Kafedra viiskovoi pidhotovky [National University of Civil Defence of Ukraine. Department of Military Training]. (n.d.). *Teoretychni osnovy zastosuvannya aerosoliv. Metodychna rozrobka shchodo provedennia hrupovoho zaniattia – Theoretical foundations of aerosol application: Methodological guidelines for conducting group classes*. [https://nu-czu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ\\_2\\_17.pdf](https://nu-czu.edu.ua/images/topmenu/kafedry/kafedra-viiskovoi-pidhotovky/distant-content/RHBZ_2_17.pdf).
10. Shydlovskiy, A. A. (1973). *Osnovy pyrotekhniki [Machine-building]*. Mashynostroenye.
11. Herbert Ellern. (1968). Military and Civilian Pyrotechnics. Chemical Publishing Company INC. New York.
12. James C. Eaton, Richard J. Lopinto, Winifred G. Palmer health effects of hexachloroltrhane (HC) smoke - Technical report 9402 – 1994. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA277838.pdf>.
13. Loh, C.H., Chang, Y.W., Liou, S.H., Chang, J.H., Chen, H.I. (2006). Case report: hexachloroethane smoke inhalation: a rare cause of severe hepatic injuries. *Environ Health Perspect.* 114(5), 763-5. <https://doi.org/10.1289/ehp.8635>.
14. Ellern Herbert. (1968). Military and Civilian Pyrotechnics – Softcover Publisher: Chemical Publishing Company.
15. El Idrissi, A., van Berkel, L., Bonekamp, N. E., Dalemans, D. J. Z., van der Heyden, M. A. G. (2017) The toxicology of zinc chloride smoke producing bombs and screens. *Clinical Toxicology*, 55(3), 167–174. <https://doi.org/10.1080/15563650.2016.1271125>.
16. John Landry. Are Smoke Bombs Safe to Breathe? BS, RRT. 2025.Updated: Aug 22, 2025 <https://www.respiratorytherapyzone.com/smoke-bombs-safe-breathe>.
17. Sporiahin, E. O., Varlan, K. Ie. (2011). Navchalnyi posibnyk do vyvchennia kursu «Fizyko-khimichni ta ekspluatatsiini vlastyosti spetsmaterialiv» [Study guide for the course “Physical, chemical and operational properties of special materials”]. <http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/ab59a56fcd58655d53ca0d38ed57b13F-x-ta-eksloat.-vlastiv.-specmaterialiv.pdf>.

18. Dovhopolov, A.Yu., Nekrasov, S.S., Kolesnyk, V.O., Dehtiarov, I.M., Lupyr, V.V. (2024). Rozrobka napivavtomatyzhnoyi systemy aerolozhno maskuvannya dlia ne spetsializovanoho viiskovoho ta evakuatsiinoho transportu [Development of a semi-automatic aerosol camouflage system for non-specialised military and evacuation transport]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti – Quality control methods and instruments*, 2, 94-104. [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2\(53\)-94-104](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2024-2(53)-94-104).

19. Dovhopolov, A.Yu., Kolesnyk, V.O., Nekrasov, S.S., Fadieiev, V. M., Proskurnia, S. I. (2025). Kompleks dlia postanovky kombinovanoi dymovoi zavisy dlia nespetsializovanoho viiskovoho transportu [Complex for setting up a combined smoke screen for non-specialised military transport]. Pat. 160673 Ukraina: MPKF41H9/06; F42B3/10; F42C19/00; F42D3/00; №u202502844; zaiavl. 2025-06-13; opubl. 2025-09-24, Biul. № 39.

Дата першого надходження статті до видання: 25.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.12.2025

UDC 544.02+662.1+66.03

**Lyudmila Ponomarova<sup>1</sup>, Andrii Dovhopolov<sup>2</sup>,  
Volodymyr Lupyr<sup>3</sup>, Artem Lazarenko<sup>4</sup>, Bohdan Kozlov<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Chemical Sciences, Associate Professor, Head of Theoretical and Applied Chemistry Department  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua](mailto:l.ponomarova@chem.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1637-3229>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Senior lecturer of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:a.dovhopolov@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9094-4923>

<sup>3</sup>General Director of LLC Scientific and Production Company “Papyrus”  
Sumy State University (Sumy, Ukraine)

E-mail: [vladimir@vcity.sumy.ua](mailto:vladimir@vcity.sumy.ua)

<sup>4</sup>PhD student of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools  
Sumy State University (Sumy, Ukraine);  
member of NGO Industry 5.UA

E-mail: [y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua](mailto:y.nekrasov@tmvi.sumdu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4681-383X>

<sup>5</sup>student

Theoretical and Applied Chemistry Department Sumy State University, Sumy State University (Sumy, Ukraine)  
E-mail: [kozlovbogdan95@gmail.com](mailto:kozlovbogdan95@gmail.com)

## DEVELOPMENT OF SAFE PYROTECHNIC SMOKE COMPOSITIONS: CHEMICAL ASPECT AND TOXICOLOGICAL ASSESSMENT

*This article presents a thorough investigation into the chemical composition, reaction mechanisms, and toxicological effects of various pyrotechnic smoke mixtures, with an emphasis on developing safer and environmentally friendlier formulations. Traditional pyrotechnic smokes, frequently composed of hexachloroethane, zinc chloride, and red phosphorus mixtures, generate hazardous combustion products such as hydrochloric acid, phosgene, and chlorinated hydrocarbons. These toxic agents pose significant health risks including respiratory irritation, cytotoxicity, genotoxicity, and liver damage, confirmed by both in vitro and in vivo studies.*

*To address these concerns, the researchers focused on formulating signal smoke compositions using potassium nitrate as an oxidizer, sucrose as fuel, and paraffin as a coolant/moderator. This tri-component system decomposes predominantly into less harmful compounds like carbon dioxide, water vapor, nitrogen, and potassium carbonate, aligning with green chemistry principles and reducing toxic emissions. The results of an experimental study of a signal smoke mixture based on potassium nitrate (as an oxidant), sucrose (as a fuel) and paraffin (as a coolant) are presented. Six mixtures were tested, in which the content of the oxidant, fuel and coolant was sequentially changed. To determine the best ratio of the smoke signal mixture, the smoke yield, ignition time and burning duration were observed. The best ratio of the smoke signal composition provides the best color yield, the shortest ignition time and the longest burning duration. The best result was observed at a ratio of 37,5 wt.% KNO<sub>3</sub>, 37,5 wt.% sucrose and 25% paraffin with an ignition time of 5 s and a burning duration of 90 s with consistent color transparency and smoke density. These findings support eco-friendly pyrotechnics for signaling and obscuration, with applications in military and civilian uses, backed by Ukrainian patents and toxicity literature.*

**Keywords:** pyrotechnic smoke bombs; metal-chloride mixtures; signal smoke; chemical combustion reactions; aerosol toxicity; safety.

Fig.: 1. References: 19.

**Тетяна Геннадіївна Філінська<sup>1</sup>, Карина Володимирівна Приходько<sup>2</sup>,  
Антоніна Олександрівна Філінська<sup>3</sup>, Олег Вікторович Черваков<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Український державний університет науки і технологій навчально-науковий інститут  
«Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [f111nskaya@ukr.net](mailto:f111nskaya@ukr.net), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

<sup>2</sup>магістрант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Український державний університет науки і технологій ННІ  
«Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [karinaprihodko54@gmail.com](mailto:karinaprihodko54@gmail.com)

<sup>3</sup>старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції  
Український державний університет науки і технологій ННІ  
«Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [antoniyafilin@ukr.net](mailto:antoniyafilin@ukr.net), **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

<sup>4</sup>доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів,  
жирів та харчової продукції

Український державний університет науки і технологій ННІ

«Український державний хіміко-технологічний університет» (Дніпро, Україна)

**E-mail:** [ochervakov@ukr.net](mailto:ochervakov@ukr.net), **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1631-3592>

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬКОСТІ ЖОЛУДЕВОГО БОРОШНА НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ КЕКСІВ**

Борошняні кондитерські вироби, які мають сталий попит у споживачів, не завжди відповідають вимогам нутриціології. Розширення їх асортименту здійснюється за рахунок введення до рецептур інноваційних інгредієнтів, у тому числі отримуваних з нетрадиційної сировини. Одним з широко використовуваних технологічних прийомів при виготовленні борошняних кондитерських виробів підвищеної харчової цінності є повна або часткова заміна пшеничного борошна на безглютенове, що потребує дослідження впливу кількості останнього на властивості кінцевого продукту. При заміні пшеничного борошна на жолудеве має місце прогнозоване зменшення клейковини з 28% (для пшеничного борошна) до 14 % (для суміші пшеничного й жолудевого борошна у співвідношенні 1:1). В статті наведені результати дослідження органолептичних характеристик (зовнішнього вигляду, кольору, запаху, смаку, вигляду на зрізі) кексів з різним вмістом жолудевого борошна у використовуваний борошняній суміші. Найвищі органолептичні оцінки отримали зразки з вмістом жолудевого борошна на рівні 5-10 %. Вони незначною мірою поступалися за показниками контрольному зразку, зберігали привабливий вигляд, приємний аромат, м'яку консистенцію та типовий солодкий смак. Заміна 50% пшеничного борошна на жолудеве призводила до суттєвого збільшення показників кислотності (з 0,59 до 1,25 °) та лужності (з 0,36 до 0,86 °). Зі зростанням частки жолудевого борошна в тісті збільшувався показник упікання, що проявлялося в інтенсивнішій втраті маси через випаровування вологи. Такі результати зумовлені більш розвиненою пористістю, змінами у водозв'язуючій здатності тіста та підвищеною теплопровідністю, яку забезпечує жолудеве борошно. Встановлено, що вміст вологи в кексах з додаванням жолудевого борошна залишався відносно стабільним, його величина була в межах від 23,0 до 23,3 % і не перевищувала норми (31 %). За результатами виконаних досліджень визначено оптимальний вміст жолудевого борошна в суміші з пшеничним (до 20 %). Така кількість забезпечує збагачення готового виробу корисними нутрієнтами, не дає суттєвого погіршення показників якості отримуваних виробів та незначною мірою впливає на колір (темніший) і смак (горіховий відтінок) кексів з жолудевим борошном.

**Ключові слова:** кекси; жолудеве борошно; клейковина; органолептичні показники; вологість; кислотність; лужність, упікання.

Бібл.: 19.

**Актуальність теми дослідження.** Борошняні кондитерські вироби представлені на харчовому ринку України в широкому асортименті, який охоплює великий спектр продукції: печиво, пряники, тістечка, кекси та ін. Борошняні кондитерські вироби користуються сталим попитом, їх добове споживання в середньому дорівнює близько 500 г на душу населення. Вони домінують в структурі кондитерської галузі, де їх частка складає більше половини (55,3 %) [1; 2].

Як багатокомпонентні продукти, борошняні кондитерські вироби залишаються бажаним об'єктом досліджень науковців і спеціалістів харчової галузі. Вивченню властивостей нових рецептурних компонентів, їхнього впливу на показники якості кінцевого продукту приділяється значна увага. За хімічним складом та харчовою цінністю традиційні борошняні кондитерські вироби у більшості своїй не відповідають вимогам нутриціоло-

гії. Їм притаманний високий вміст жирів із підвищеною часткою в складі гідрогенізованих жирів (*трансїзомерів*) і простих вуглеводів (переважно сахарози), тоді як білки, харчові волокна, вітаміни присутні в недостатній кількості. Тож актуальними є рецептурні інновації, зорієнтовані на створення продуктів фізіологічно-функціонального призначення, збагачені інгредієнтами, які сприятливо впливають на організм людини [3].

**Постановка проблеми.** Кекси це борошняні кондитерські вироби, які виготовляються із здобного тіста, можуть бути з начинками або без них, а також мати у складі різні добавки. Корисність кексів обумовлена присутніми нутрієнтами й досягається шляхом додаткового введення: вітамінів; мікроелементів; харчових волокон; омега-3 та омега-6 жирних кислот; незамінних амінокислот; дієтичних добавок та безглютенового борошна (у тому числі й з нетрадиційної сировини, наприклад, жолудевого). Останнє при додаванні у великих кількостях з метою зменшення в рецептурі пшеничного борошна може змінювати як якісні показники кінцевого продукту, так і структурно-механічні властивості тіста та впливати на технологічні параметри процесу виготовлення. Тому важливими є дослідження впливу кількості жолудевого безглютенового борошна на властивості кексів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розширення асортименту борошняних кондитерських виробів супроводжується пошуком нових рецептурних компонентів, дослідженням їх властивостей і вивченням впливу на характеристики одержуваного продукту. Інноваційні підходи реалізуються різними шляхами, серед яких: повне вилучення окремих рецептурних складових, або часткова їх заміна; введення функціональних добавок та збагачувальних нутрієнтів.

Виробництво кексів регламентується державним стандартом ДСТУ 4505:2005 «Кекси. Загальні технічні умови», який встановлює вимоги до якості, органолептичних показників (форма, поверхня, колір), а також технічних умов для випікання та зберігання кексів, що виробляються в Україні. З метою розширення асортименту, покращення нутрієнтного складу кексів до їх складу додають: насіння (гарбузове) [4], фруктово-овочеві порошки (айви звичайної та хеномелесу) [5] і пюре (гарбузове) [6]. Оскільки більша частина кексів виготовляється з використанням маргаринів, вершкового масла або кондитерських жирів з високим вмістом *трансїзомеризованих* жирних кислот, їх частково замінюють на рослинні олії (конопляну) [7]. Розроблені рецептури безглютенових кексів з використанням борошна із насіння нішевих культур (конопляного, лляного, кунжутного, гарбузового) [8], сумішей борошна круп'яних культур (рисового і кукурудзяного) [9] та з концентратом сколотин [10]. Запропоновано виготовляти кекси з частковою заміною пшеничного борошна на люпинове, яке не містить холестерину і глютену, характеризується низьким вмістом крохмалю, значною часткою білка і харчових волокон та має низький глікемічний індекс (ГІ) [11].

Представлені технології виготовлення вегетаріанських борошняних кондитерських виробів з вівсяного борошна та ламінарії [12], а кекси з органічної сировини з підвищеним мінеральним складом містять в рецептурах: різні види борошна (гречане, житнє, амарантове); сиропи (агави, рисовий, гарбузовий); рослинні олії (кунжутну, сезамову, амарантову); сушені плоди (фезаліс, шовковицю, родзинки, журавлина); висівки (льняні, житні); волоські горіх та шматочки гарбуза [13]. Актуальним питанням сьогодення є розширення асортименту органічних кексів у контексті екоконсьюмеризму з урахуванням ступеня негативного впливу харчових продуктів на людину та екологію, а також з визначенням та порівнянням індексу сталого харчування для кексів традиційної і вдосконаленої рецептури [14].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Проведений аналіз останніх публікацій показав, що з метою розширення асортименту борошняних кондитерських виробів, у тому числі й кексів, до рецептурного складу додають інгредієнти, які збагачують їх корисними нутрієнтами. Також замінюють жирові компоненти на рослинні олії і впроваджують технології, що передбачають повну або часткову заміну пшеничного борошна на безглютенові види, що потребує дослідження їх впливу на показники якості кексів.

**Метою статті** є дослідження впливу кількості жолудевого борошна в суміші з пшеничним на показники якості кексів.

**Виклад основного матеріалу.** Для досліджень використовували жолудеве борошно з плодів поширеного в Україні дуба *Quercus robur*. Базова (еталонна) рецептура кексів (табл. 1), включала основні інгредієнти: пшеничне борошно, цукор, яйця, вершкове масло, молоко, а також допоміжні – розпушувач, ванільний цукор та сіль. З метою розроблення функціонального борошняного кондитерського виробу виконувалася часткова заміна пшеничного борошна на жолудеве у різних відсоткових співвідношеннях – від 5 до 50 % із кроком 5 %.

Таблиця 1 — Рецептура кексів на пшеничному борошні

| Рецептурний компонент | Кількість компоненту, г | Відсотковий вміст, % |
|-----------------------|-------------------------|----------------------|
| Борошно пшеничне      | 200                     | 28,130               |
| Цукор                 | 150                     | 21,100               |
| Яйця                  | 150                     | 21,100               |
| Вершкове масло        | 100                     | 14,065               |
| Молоко                | 100                     | 14,065               |
| Розпушувач            | 5                       | 0,700                |
| Ванільний цукор       | 5                       | 0,700                |
| Сіль                  | 1                       | 0,140                |
| РАЗОМ                 | 711                     | 100                  |

Одним із ключових показників є вміст клейковини в борошні, оскільки від нього залежить здатність тіста утримувати газу під час випікання, що, своєю чергою, визначає об'єм, пористість, структуру та інші органолептичні властивості готового виробу. Визначення вмісту клейковини борошняних сумішей здійснювалося відповідно до методики, викладеної в ДСТУ ISO 6645:2004 «Борошно пшеничне. Визначення вмісту сухої клейковини». Одержані результати (табл. 2) дозволяють зробити висновок щодо придатності суміші пшеничного і жолудевого борошна до використання у рецептурі кексів, а також сприяють прийняттю технологічних рішень на подальших етапах виробництва.

Як видно з наведених у табл. 2 результатів маємо прогнозоване зменшення вмісту клейковини в сумішах зі збільшенням кількості жолудевого борошна. Для регулювання кількості клейковини в борошні можна використовувати суху пшеничну клейковину з масовою часткою білків 72-83 % [15; 16].

Дослідні зразки кексів виготовляли за наступною технологією. Вершкове масло температурою 40 °C подавали в тістомісильну машину і збивали протягом 7-10 хв, потім додавали частину цукру і сіль та продовжували збивати ще 5-7 хв. В утворену масу поступово вводили спочатку яйця і продовжували збивання 20-30 хв, а потім при низькій частоті обертання лопатей машини додавали ванільний цукор, сіль та розпушувач. Окремо в змішувачі до молока додавали іншу частину цукру й кип'ятили до повного розчинення кристалів. Отриманий розчин охолоджували й поступово вводили в тістомісильну машину.

Таблиця 2 – Вміст клейковини в пшенично-жолудевих борошняних сумішах

| Склад суміші, %  |                  | Вміст клейковини, % |
|------------------|------------------|---------------------|
| Пшеничне борошно | Жолудеве борошно |                     |
| 100              | 0                | 28,0                |
| 95               | 5                | 26,6                |
| 90               | 10               | 25,2                |
| 85               | 15               | 23,8                |
| 80               | 20               | 22,4                |
| 75               | 25               | 21,0                |
| 70               | 30               | 19,6                |
| 65               | 35               | 18,2                |
| 60               | 40               | 16,8                |
| 55               | 45               | 15,4                |
| 50               | 50               | 14,0                |



Пшеничне і жолудеве борошно після змішування у визначених пропорціях останніми подавали в тістомісильну машину й перемішували до отримання тіста у вигляді однорідної маси. Тісто помішали у змащені жиром форми та випікали при 160-200 °С протягом 20-25 хв. Отримані зразки (рис. 1) з різним вмістом у борошняній суміші жолудевого борошна відрізнялися за зовнішнім виглядом.



Рис. 1. Зовнішній вигляд кексів з різним вмістом жолудевого борошна:  
5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 – вміст жолудевого борошна, %

Як видно на рис. 1, при підвищенні частки жолудевого борошна мало місце потемніння виробів і зменшення їх об'єму, особливо для зразків з вмістом жолудевого борошна понад 35 %. Кекси з вмістом жолудевого борошна до 20% мали задовільний зовнішній вигляд: рівномірну форму; добре підрум'янену поверхню без великих тріщин та осідань.

Вигляд м'якуша дослідних зразків кексів (рис. 2) також мав відмінності. Для зразків з вмістом жолудевого борошна до 20 % м'якуш залишався однорідним і пористим, без грудочок чи ущільнень. За більшої концентрації функціонального компонента (жолудевого борошна) м'якуш ставав щільнішим, менш пропеченим та вологішим, що знижувало візуальну та текстурну привабливість виробу.



Рис. 2. Вигляд на зрізі кексів з різним вмістом жолудевого борошна:  
5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 – вміст жолудевого борошна, %

Органолептичне оцінювання кексів (табл. 3) виконувалося дегустаційною комісією, до складу якої входили 5 експертів. Кожен зразок оцінювався анонімно, без зазначення рецептури.

Таблиця 3 – Органолептична оцінка дослідних зразків кексів

| Вміст<br>жолудевого<br>борошна, % | Дегустаційна оцінка |       |                 |       |      |
|-----------------------------------|---------------------|-------|-----------------|-------|------|
|                                   | Зовнішній<br>вигляд | Колір | Вигляд на зрізі | Запах | Смак |
| 0                                 | 5,0                 | 5,0   | 5,0             | 5,0   | 5,0  |
| 5                                 | 4,9                 | 4,8   | 4,9             | 4,9   | 4,8  |
| 10                                | 4,8                 | 4,7   | 4,8             | 4,8   | 4,7  |
| 15                                | 4,6                 | 4,5   | 4,6             | 4,6   | 4,4  |
| 20                                | 4,4                 | 4,2   | 4,4             | 4,3   | 4,1  |
| 25                                | 4,1                 | 3,9   | 4,0             | 4,0   | 3,8  |
| 30                                | 3,8                 | 3,5   | 3,9             | 3,9   | 3,6  |
| 35                                | 3,5                 | 3,2   | 3,7             | 3,7   | 3,3  |
| 40                                | 3,2                 | 3,0   | 3,7             | 3,5   | 3,0  |
| 45                                | 2,9                 | 2,8   | 3,2             | 3,1   | 2,6  |
| 50                                | 2,5                 | 2,5   | 3,0             | 2,8   | 2,3  |

Після підсумовування результатів було виведено середній бал для кожного зразка. На рис. 2 зображено зміну середніх балів органолептичного оцінювання залежно від кількості жолудевого борошна в рецептурі. Найвищі органолептичні оцінки отримали зразки з вмістом жолудевого борошна на рівні 5-10 %. Вони незначною мірою поступалися за показниками контрольному зразку, зберігали привабливий вигляд, приємний аромат, м'яку консистенцію та типовий солодкий смак. Для дослідних зразків із вмістом жолудевого борошна 20 % і більше оцінки за всіма параметрами були нижчими ніж для еталонного зразка, виготовленого виключно на пшеничному борошні. Вироби були темнішими, менш пухкими, зі слабо вираженим ароматом і гіркуватим присмаком, зумовленим присутніми в жолудевому борошні дубильними речовинами.

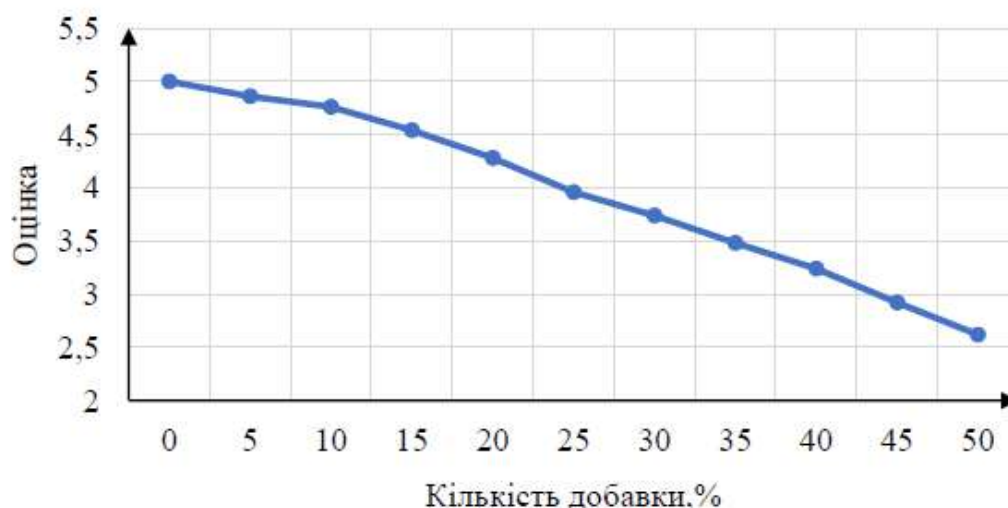


Рис. 3. Залежність середнього балу (оцінки) органолептичного оцінювання кексів від кількості добавки (жолудевого борошна)

Вміст води є одним із ключових фізико-хімічних показників якості кексів, що безпосередньо впливає на їхню консистенцію, термін зберігання та стійкість до мікробіологічного псування. Оптимальний рівень води забезпечує м'якість і свіжість виробу, тоді як надмірна вологість може знизити стійкість до зберігання, а надто низька – призвести до сухості та крихкості продукту. Визначення вологості виконували

висушуванням зразків до сталої маси згідно з ДСТУ 4910:2008 «Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток води та сухих речовин». На основі отриманих результатів досліджень (табл. 4) встановлено, що вміст води в кексах з додаванням жолудевого борошна залишався відносно стабільним, його величина була в межах від 23,0 до 23,3 % і знаходилася в межах норми (10-31 %) [17]. Найнижче значення вологості (23,0 %) спостерігалось у контрольному зразку без жолудевого борошна і зберігалось при додаванні останнього в кількості 5 %. Загальна тенденція вказує на незначне зростання вологості для кексів з вмістом жолудевого борошна 10 % і більше. Ця властивість може позитивно впливати на соковитість і м'якість готового виробу, особливо при тривалому зберіганні. Тож можемо констатувати, що додавання жолудевого борошна не знижує показник вологості готового продукту, а навпаки – сприяє збереженню оптимального рівня води, що є перевагою з погляду органолептичних властивостей та строку придатності кексів з жолудевим борошном.

Кислотність не є нормованим показником для кексів, виготовлених на розпушувачі, однак його величина свідчить про свіжість виробу, правильність перебігу технологічного процесу та мікробіологічну стабільність під час зберігання. Підвищення кислотності може вказувати на початок псування продукту або про надлишок кислих інгредієнтів у рецептурі. Визначення кислотності проводили згідно з ДСТУ 5024:2008 «Вироби кондитерські. Методи визначення кислотності та лужності» титруванням водної витяжки зразків розчином гідроксиду натрію у присутності фенолфталеїну як індикатора. Кислотність виражали у градусах кислотності ( $^{\circ}$ ), що відповідає кількості мілілітрів 0,1 н розчину NaOH, необхідного для нейтралізації кислот, які містяться у 100 г м'якушки. Виконані дослідження вказують на збільшення показника кислотності зі збільшенням частки жолудевого борошна (табл. 4). Останнє має вищу кислотність, ніж пшеничне, воно містить в своєму складі дубильні речовини та більше органічних кислот, що й підвищує його кислотність. Зменшити вміст дубильних речовин в жолудевому борошні, можна коригуючи температурний режим процесу вилучення з нього танінів [18].

Лужність, один з показників якості кексів, який дозволяє оцінити наявність залишкових кількостей лужних реагентів, зокрема харчової соди або інших розпушувачів, що застосовуються в рецептурі. Цей показник впливає на смак, запах і хімічну стабільність готового виробу. Надмірна лужність може призвести до появи неприємного лужного присмаку та зміни кольору м'якуша. Визначення лужності проводили згідно з ДСТУ 5024:2008 «Вироби кондитерські. Методи визначення кислотності та лужності» шляхом титрування водної витяжки зразків розчином хлоридної кислоти у присутності фенолфталеїну як індикатора. Лужність виражали у градусах лужності ( $^{\circ}$ ), що відповідає об'єму 0,1 н розчину HCl, необхідного для нейтралізації лужних компонентів, на 100 г продукту. Зі зростанням вмісту жолудевого борошна у зразках спостерігається поступове підвищення лужності (табл. 4). Починаючи з контрольного зразка (0 %), де лужність становила 0,36, і до зразка з 50 % жолудевого борошна, де вона досягла 0,86, спостерігається чітка тенденція до зростання, але без перевищення норми (2,0) [17].

Таблиця 4 – Упкання і фізико-хімічні показники кексів з різним вмістом жолудевого борошна

| Вміст жолудевого борошна, % | Упкання, % | Фізико-хімічні показники |                         |                      |
|-----------------------------|------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|
|                             |            | Вміст води, %            | Кислотність, $^{\circ}$ | Лужність, $^{\circ}$ |
| 1                           | 2          | 3                        | 4                       | 5                    |
| 0                           | 6,3        | 23,0                     | 0,59                    | 0,36                 |
| 5                           | 7,5        | 23,0                     | 0,67                    | 0,40                 |
| 10                          | 7,5        | 23,1                     | 0,75                    | 0,46                 |



Закінчення таблиці 4

| 1  | 2   | 3    | 4    | 5    |
|----|-----|------|------|------|
| 15 | 7,5 | 23,1 | 0,75 | 0,50 |
| 20 | 7,5 | 23,2 | 0,79 | 0,56 |
| 25 | 8,2 | 23,2 | 0,84 | 0,60 |
| 30 | 8,2 | 23,3 | 0,92 | 0,66 |
| 35 | 8,2 | 23,2 | 1,00 | 0,70 |
| 40 | 9,1 | 23,2 | 1,13 | 0,76 |
| 45 | 9,1 | 23,1 | 1,17 | 0,82 |
| 50 | 9,1 | 23,2 | 1,25 | 0,86 |

Упикання вказує на втрату маси виробу під час термічного оброблення, здебільшого через випаровування води та летких речовин. При цьому відбувається остаточне формування структури виробу, закріплення пористості, а також утворення смакових і ароматичних властивостей. На цьому етапі важливе значення відіграють температура та тривалість випікання, які залежать від виду тіста та додаткових інгредієнтів, зокрема жолудевого борошна. Для визначення упікання (%) зважували зразки до випікання (M1) і після випікання (M2). Різниця M1 – M2 вказує на втрату маси виробу в процесі термічного оброблення. Відношення (M1 – M2) до початкової маси M1, виражене у відсотках ( $\times 100\%$ ) і є величиною упікання [19]. Результати визначення упікання для зразків з різним вмістом жолудевого борошна наведені в таблиці 4.

Наведені результати свідчать про те, що зі зростанням частки жолудевого борошна в тісті збільшується ступінь упікання, що проявляється в інтенсивнішій втраті маси через випаровування води. Це може бути зумовлено більш розвиненою пористістю, змінами у водозв'язуючій здатності тіста та підвищеною теплопровідністю, яку забезпечує жолудеве борошно. Отже, додавання жолудевого борошна до 50 % сприяє інтенсивному упіканню виробів.

**Висновки.** На підставі проведених досліджень визначено оптимальну кількість жолудевого борошна (до 20 %) для заміни пшеничного в рецептурі кексів, яка дозволяє отримувати корисний продукт без суттєвого негативного впливу на його показники якості. Встановлено, що при збільшенні кількості жолудевого борошна має місце прогнозоване зменшення клейковини з 28 % (для пшеничного борошна) до 14 % (для суміші пшеничного й жолудевого борошна у співвідношенні 1:1). Заміна 50 % пшеничного борошна на жолудеве призвела до суттєвого збільшення показника лужності (з  $0,36^\circ$  до  $0,86^\circ$ ), хоча за абсолютною величиною він не перевищував норму. Збільшення показника кислотності зі збільшенням частки жолудевого борошна, пояснюється вищою кислотністю останнього за рахунок присутніх у складі дубильних речовин та більшої кількості органічних кислот. Встановлено, що вміст води в кексах з додаванням жолудевого борошна залишався відносно стабільним, його величина була в межах від 23,0 до 23,3 % і не перевищувала норми (31 %). Зі зростанням частки жолудевого борошна в тісті збільшувався показник упікання, що проявлялося в інтенсивнішій втраті маси через випаровування води. Такі результати зумовлені більш розвиненою пористістю, змінами у водозв'язуючій здатності тіста та підвищеною теплопровідністю, яку забезпечує жолудеве борошно.

#### Список використаних джерел

1. Резвих, Н. І., & Федоренко, Л. Є. (2022). Аналіз споживання борошняних кондитерських виробів у харчуванні людини. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (5), 77-82. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.10>.
2. Латишев К. О., Мороз О. В., Герасимчук В. В. (2020). Споживчі переваги як основа формування асортиментної лінійки борошняних кондитерських виробів. *Вісник Хмельницького національного університету*, (5), 102–106. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2020-286-5-19>.
3. Рудавська, Г., Вежлівцева, С., & Бузіян, М. (2018). Інноваційні інгредієнти для кондитерських виробів фізіологічно-функціонального призначення. *Молодий вчений*, 5 (57), 396-399. <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/4540>.

4. Kaplina, T., Stolyarchuk, V., & Dudnyk, S. (2018). Changes in qualitative indices of cakes depending on part of added pumpkin seeds. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 114-118. <https://doi.org/10.15421/nvlvet8521>.
5. Лебединець В.Т., Гаврилишин В.В., Лебединець А.І. (2018). Обґрунтування рецептурного складу кексів з використанням продуктів переробки айви звичайної та хеномелесу. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*, (21), 73-77. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2018-21-11>.
6. Ряполова, І., & Микулінська, Д. (2021). Досвід застосування нетрадиційної сировини функціонального призначення у борошняних кондитерських виробках. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (1), 36-41. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.1.6>.
7. Єсауленко А.А., Мамченко Л.Є., Неміріч О.В., Кузьмін О.В., & Матіяшук О.В. (2023). Удосконалення технології кексів з продуктами переробки насіння конопель. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, (4), 118-126. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.15>.
8. Сова Н., Худайбердієва К., Коваленко Н., & Михненко І. (2021). Використання борошна із насіння нішевих культур у технології виробництва кексів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, (4 (10), 94-100. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.13>.
9. Yudina, T. I., Bezruchenko, O. M., & Ahapova, O. V. (2020). Gluten-free cakes with cereal flour. *Обладнання та технології харчових виробництв*, (1), 19-25. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Otkhy\\_2020\\_1\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Otkhy_2020_1_5).
10. Bezruchenko, O. M. (2022). Технологія безглютенових кексів з концентратом сколотин. In *Innovative technologies and equipment: Development prospects of the food and restaurant industries* (pp. 38-61). Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-3>.
11. Кошель О., Савченко М., Перцевой Ф., & Маренкова Т. (2024). Удосконалення технології кексів з використанням люпинового борошна. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 341(5), 145-150. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-22>.
12. Antoniuk, I. Yu., & Medvedieva, A. O. (2022). Технологія вегетаріанського капкейку «Деліс» із використанням вівсяного борошна та ламінарії. In *Innovative technologies and equipment: Development prospects of the food and restaurant industries* (pp. 1-17). Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-1>.
13. Ткаченко А. С. (2020) Наукове обґрунтування розроблення кексів з органічної сировини з підвищеним мінеральним складом. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*, (23), 110-115. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2020-23-14>.
14. Ткаченко А. (2025). Розширення асортименту органічних кексів у контексті еко-консьюмеризму. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 344(4), 646-652. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-344-4-92>.
15. Дробот, В. І., Сильчук Т. А., & Білик О. А. (2005). Вплив сухої пшеничної клейковини на технологічний процес і якість хліба. *Хранение и переработка зерна*, 4(70), 53-55. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/4321>.
16. Дробот, В. І., Сильчук Т. А., & Удворгелі Л. І. (2005). Вплив сухої пшеничної клейковини на технологічні показники та якість житньо-пшеничного хліба. *Зернові продукти і комбікорми*, (2), 53-55. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/5923>.
17. Палько Н. С., Давидович О. Я., Заяць С. В., & Горобець О. М. (2024). Удосконалення технології кексів з використанням нетрадиційної сировини. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки»*, (2), 12-17. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-2-2>.
18. Філінська Т.Г., Приходько К.В., & Філінська А.О. Дослідження впливу термічного оброблення жолудів на властивості отримуваних продуктів. *Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Стан і перспективи розвитку хімічної, харчової та парфумерно-косметичної галузей промисловості»* (м. Хмельницький, 30 травня 2025 р.), 173-175. ХНТУ.
19. Дробот В. І. (2002). *Технологія хлібопекарського виробництва*. Логос.

## References

1. Rezvykh, N. I., & Fedorenko, L. Ye. (2022). Analiz spozhyvannia boroshnianskykh kondyterskykh vyrobiv u kharchuvanni liudyny [Analysis of flour confectionery consumption in human nutrition]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky, Tavriya Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (5), 77-82. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.5.10>.

2. Latyshev K. O., Moroz O. V., Herasymchuk V. V. (2020). Spozhyvchi perevahy yak osnova formuvannia asortymentnoi liniiky boroshnianykh kondyterskykh vyrobiv [Consumer preferences as the basis for forming a range of flour confectionery products]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Khmelnytskyi National University*, (5), 102-106. DOI: 10.31891/2307-5740-2020-286-5-19.
3. Rudavska, H., Vezhlytseva, S., & Buzian, M. (2018). Innovatsiini inhrediienty dlia kondyterskykh vyrobiv fiziologichno-funktsionalnoho pryznachennia [Innovative ingredients for confectionery products with physiological and functional properties]. *Molodyi vchenyi – Young scientist*, 5(57), 396-399. <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/4540>.
4. Kaplina, T., Stolyarchuk, V., & Dudnyk, S. (2018). Changes in qualitative indices of cakes depending on part of added pumpkin seeds. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 114-118. <https://doi.org/10.15421/nvlvet8521>.
5. Lebedynets, V. T., Havrylyshyn, V. V., & Lebedynets, A. I. (2018). Obgruntuvannia retsepturnoho skladu keksiv z vykorystanniam produktiv pererobky aivy zvychnoi ta khenomelesu [Justification of the recipe composition of cakes using products processed from common quince and henomeles]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, (21), 73-77. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2018-21-11>.
6. Riapolova, I., & Mykulinska, D. (2021). Dosvid zastosuvannia netradytsiinoi syrovyny funktsionalnoho pryznachennia u boroshnianykh kondyterskykh vyrobakh [Experience in using non-traditional functional ingredients in flour confectionery products]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky – Tavriya Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (1), 36-41. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.1.6>.
7. Yesaulenko A.A., Mamchenko L.Ie., Niemirich O.V., Kuzmin O.V., & Matyiashchuk O.V. (2023). Udoskonalennia tekhnolohii keksiv z produktamy pererobky nasinnia konopel [Improvement of cupcake technology using processed hemp seeds]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky Tavriya Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (4), 118-126. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.4.15>.
8. Sova, N., Khudaiberdieva, K., Kovalenko, N., & Mykhnenko, I. (2021). Vykorystannia boroshna iz nasinnia nishevykh kultur u tekhnolohii vyrobnytstva keksiv [The use of flour from niche crops in cake production technology]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: New Solutions in Modern Technologies*, (4(10)), 94–100. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.04.13>.
9. Yudina, T. I., Vezruchenko, O. M. Ahapova, O. V. (2020). Gluten-free cakes with cereal flour. *Obladnannia ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv – Food production equipment and technologies*, (1), 19-25. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Otkhv\\_2020\\_1\\_5](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Otkhv_2020_1_5).
10. Bezruchenko, O. M. (2022). Tekhnolohiia bezghliutenovykh keksiv z kontsentratom skoloty [Gluten-free cupcake technology with whey concentrate]. *Innovative technologies and equipment: development prospects of the food and restaurant industries: Scientific monograph* (pp. 38-61). Riga, Latvia: "Baltija Publishing". <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-3>.
11. Koshel, O., Savchenko, M., Pertsevoi, F., & Marenkova, T. (2024). Udoskonalennia tekhnolohii keksiv z vykorystanniam liupynovoho boroshna [Improvement of cupcake technology using lupin flour]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 341(5), 145-150. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-22>.
12. Antoniuk, I. Yu., Medvedieva, A. O. (2022). Tekhnolohiia vehetarianskoho kapkeiku «Delis» iz vykorystanniam vivsianoho boroshna ta laminarii [The technology of the Delis vegetarian cupcake using oat flour and kelp]. *Innovative technologies and equipment: development prospects of the food and restaurant industries: Scientific monograph* (pp. 1-17). Riga, Latvia: "Baltija Publishing", <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-1>.
13. Tkachenko, A. S. (2020) Naukove obgruntuvannia rozroblennia keksiv z orhanichnoi syrovyny z pidvyshchenym mineralnym skladom [Scientific justification for the development of cakes made from organic raw materials with increased mineral content]. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, (23), 110-115. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2020-23-14>.

14. Tkachenko, A. (2025). Rozshyrennia asortymentu orhanichnykh keksiv u konteksti eko-konsiumeryzmu [Expanding the range of organic cakes in the context of eco-consumerism]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 344(4), 646-652. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-344-4-92>.
15. Drobot, V. I., Sylchuk, T. A., Bilyk, O. A. (2005). Vplyv sukhoi pshenychnoi kleikovyny na tekhnolohichni protses i yakist khliba [The effect of dry wheat gluten on the technological process and quality of bread]. *Khranenyie y pererabotka zerna – Grain storage and processing*, 4(70), 53-55. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/4321>.
16. Drobot, V. I., Sylchuk, T. A., Udvorheli, L. I. (2005). Vplyv sukhoi pshenychnoi kleikovyny na tekhnolohichni pokaznyky ta yakist zhytno-pshenychnoho khliba / V. I. Drobot // [The effect of dry wheat gluten on the technological characteristics and quality of rye-wheat bread.] *Zernovi produkty i kombikormy. - Grain products and compound feed*, (2), 53-55. <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/5923>.
17. Palko, N. S., Davydovych, O. Ya., Zaiats, S. V., & Horobets, O. M. (2024). Udoskonalennia tekhnolohii keksiv z vykorystanniam netradytsiinoi syrovyny [Improvement of cupcake technology using unconventional raw materials]. *Naukovyi visnyk Poltavskoho universytetu ekonomiky i torhivli. Seriiia «Tekhnichni nauky» Improvement of cupcake technology using unconventional raw materials*, (2), 12-17. <https://doi.org/10.37734/2518-7171-2024-2-2>.
18. Filinska, T. H., Prykhodko, K. V., & Filinska, A. O. (30 May 2025). Doslidzhennia vplyvu termichnoho obrobлення zholudiv na vlastyvoli otrymuvanykh produktiv [Study of the effect of thermal treatment of acorns on the properties of the products obtained]. *VII Vseukrainska naukovo praktychna konferentsiia «Stan i perspektivy rozvytku khimichnoi, kharchovoi ta parfumerno-kosmetychnoi haluzei promyslovosti» 30 travnia 2025 roku, m. Khmelnytskyi, KhNTU – Materials of the VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference “The State and Prospects of Development of the Chemical, Food, and Perfume and Cosmetics Industries”* (pp. 173-175).
19. Drobot, V. I. (2002). *Tekhnolohiia khlibopekarskoho vyrobnytstva [Bread baking technology]*. Lohos.

Дата першого надходження статті до видання: 03.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.11.2025

UDC 664.68:641.5

**Tetiana Filinska<sup>1</sup>, Karyna Prykhodko<sup>2</sup>, Antonina Filinska<sup>3</sup>, Oleh Chervakov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology". (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [filinskaya@ukr.net](mailto:filinskaya@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7921-1989>

<sup>2</sup>master student of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [karinaprihodko54@gmail.com](mailto:karinaprihodko54@gmail.com)

<sup>3</sup>senior lecturer of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [antoniyafilein@ukr.net](mailto:antoniyafilein@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6975-6186>

<sup>4</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of department of the Department of Technologies of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products Ukrainian State University of Science and Technology, Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" (Dnipro, Ukraine)

E-mail: [ochervakov@ukr.net](mailto:ochervakov@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1631-3592>

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF ACORN FLOUR AMOUNT ON CAKE QUALITY INDICATORS

*Flour confectionery products, which are in constant demand among consumers, do not always meet nutritional science requirements. Their range is expanded by introducing innovative ingredients into the recipes, including those obtained from non-traditional raw materials. Among the technological methods used in the manufacture of flour confectionery products of*

increased nutritional value are as follows: complete removal of individual recipe components, or their partial replacement; introduction of functional additives and enriching nutrients rich in vitamins, trace elements, dietary fiber; omega-3 and omega-6 fatty acids, essential amino acids, etc.

Acorn flour is naturally gluten-free and represents an attractive nutritional and functional raw material. It is rich in unsaturated fatty acids and fiber, minerals, vitamins, chlorophylls, carotenoids and polyphenols, and demonstrates high anti-oxidant capacity. Therefore, the inclusion of acorn flour into the formulation of flour confectionery products, including muffins, is well justified.

An analysis of research and publications has shown that, in order to expand the range of flour confectionery products, including cupcakes, ingredients are added to the recipe that enrich them with useful nutrients. Fat components are replaced with vegetable oils and technologies are introduced that involve the full or partial substitution of wheat flour with gluten-free alternatives, which requires research into their impact on the quality indicators of cupcakes.

The aim of the article is to investigate the effect of varying amounts of acorn flour mixed with wheat flour on the quality characteristics of muffins.

When replacing wheat flour with acorn flour, a predicted decrease in gluten was found from 28% (for wheat flour) to 14% (for a mixture of wheat and acorn flour in a ratio of 1:1). The results of the study of organoleptic characteristics (appearance, color, smell, taste, internal structure) of muffins with different contents of acorn flour in the flour mixture used are presented. The highest organoleptic ratings were obtained by samples with acorn flour content of 5-10%. They were slightly inferior in indicators to the control sample, retaining an attractive appearance, pleasant aroma, soft consistency and typical sweet taste. Replacing 50% of wheat flour with acorn flour led to a significant increase in acidity (from 0.59 to 1.25) and alkalinity (from 0.36 to 0.86 °). With an increase in the proportion of acorn flour in the dough, the baking index increased, which was manifested in a more intense loss of mass due to moisture evaporation. These results can be attributed to a more developed porosity, altered water-binding capacity of the dough, and higher thermal conductivity provided by acorn flour. It was found that the moisture content in muffins with the addition of acorn flour remained relatively stable; its value was in the range from 23.0% to 23.3% and did not exceed the norm (31%). Based on the results, the optimal proportion of acorn flour in combination with wheat flour was determined to be up to 20%. This amount ensures the enrichment of the finished product with useful nutrients, does not significantly deteriorate the quality of the resulting products, and has a minor effect on the color (darker) and taste (nutty shade) of muffins with acorn flour.

**Keywords:** muffins; acorn flour; gluten; organoleptic characteristics; moisture; acidity; alkalinity; baking.

**References:** 19.

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-344-353](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-344-353)

УДК 628.477; 661.185

**Олег Олександрович Лозовий<sup>1</sup>, Вікторія Петрівна Плаван<sup>2</sup>,  
Сергій Сергійович Титаренко<sup>3</sup>, Олена Анатоліївна Охмат<sup>4</sup>,  
Євген Юрійович Зайцев<sup>5</sup>, Олена Анатоліївна Крюкова<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [o.lozovoy@biosphere-corp.com](mailto:o.lozovoy@biosphere-corp.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2228-9058><sup>2</sup>доктор технічних наук, професор завідувачка кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [plavan.vp@knutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

ResearcherID: I-5852-2015. SCOPUS Author ID: 6603130130

<sup>3</sup>аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [tytarenko.ss@knutd.edu.ua](mailto:tytarenko.ss@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6307-4482><sup>4</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біотехнології шкіри а хутра

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [oxmat.aa@knutd.edu.ua](mailto:oxmat.aa@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>

Scopus Author ID: 57194089217

<sup>5</sup>магістрант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [ktphv@knutd.edu.ua](mailto:ktphv@knutd.edu.ua)<sup>6</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження

Київський національний університет технологій і дизайну (Київ, Україна)

E-mail: [kryukova.aa@knutd.edu.ua](mailto:kryukova.aa@knutd.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>

SCOPUS Author ID: 24335433200

## ВИБІР ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ МЕХАНІЧНОГО РЕЦИКЛІНГУ ПОЛІЕТИЛЕНУ

Стаття присвячена вибору мийних засобів для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену. На основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу можна рекомендувати продукт Disponil® ENS 47 для мийки забруднених органічними домішками (рештками харчових продуктів) відходів поліетиленової плівки. Яскраво виражені лужні властивості цього продукту забезпечать швидке омилення жирів, а невисока здатність до піноутворення робить його придатним для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях. Висока мийна здатність продукту Plurafac® LF 120 дає підстави рекомендувати цей продукт для мийки сильнозабруднених відходів поліетиленової плівки в технологіях механічного рециклінгу, зокрема при підвищеній температурі.

**Ключові слова:** поверхнево-активні речовини; механічний рециклінг; відходи поліетилену; мийна здатність.

Рис.: 1. Табл.: 1. Бібл.: 16.

**Актуальність теми дослідження.** Двигуном економічного зростання в багатьох країнах стало широке застосування пластмас, головним чином завдяки їхній легкості, регульованим властивостям, довговічності та простоті обробки, що зумовило широкий спектр їх використання [1]. 5 вересня 2024 року відзначався День перевищення обсягів пластикових відходів, коли світові пластикові відходи перевищують світові можливості управління ними. Наразі 66 % населення світу проживає в районах, де обсяги пластикових відходів перевищують місцеві можливості управління ними. У 2024 році у світі було утворено понад 400 мільйонів тонн пластикових відходів. Тільки близько 10 % відходів було перероблено [2]. Майже половина відходів була утилізована на звалищах, а решта були просто спалені або викинуті в навколишнє середовище через засмічення чи незаконне скидання відходів [3].

**Постановка проблеми.** Перш ніж розпочати переробку полімерних матеріалів, важливо спочатку перетворити відходи на нову сировину. Цей процес починається після збору відходів і налічує кілька етапів, включаючи сортування, очищення (мийку), подрібнення, пресування та повторну переробку, не змінюючи хімічної структури полімерів (рис. 1). Механічний рециклінг зазвичай використовується для переробки однотипних пластикових відходів, з таких полімерів, як поліпропілен, поліетилен, поліетилентерефталат, полістирол та інші.

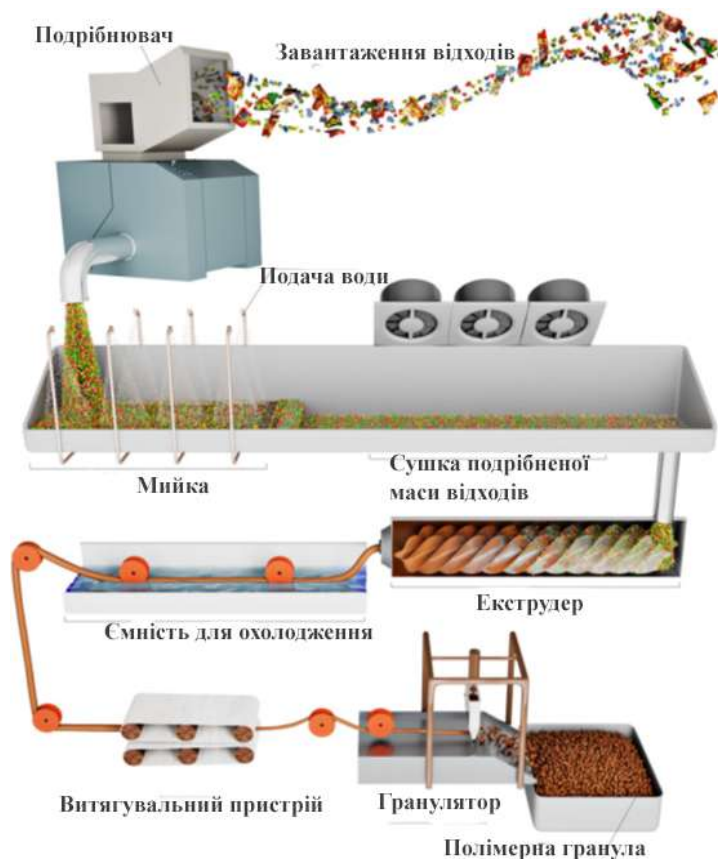


Рис. 1. Схематичне зображення процесу механічного рециклінгу  
Джерело: розроблено авторами [1].

Під час механічного рециклінгу пластикових відходів надзвичайно важливим кроком є процес очищення [1]. Домішки можуть призвести до погіршення якості переробленого продукту та негативно вплинути на його ринкову вартість. Забруднювачі загалом класифікуються на навмисно додані речовини (НР) та ненавмисно додані речовини (ННР). Як впливає з назви, НР додаються до пластику для покращення його фізико-хімічних властивостей. Ці речовини серед інших включають низку добавок, таких як антипірени, пластифікатори та стабілізатори [4]. Забруднювачі ННР можуть включати зовнішні сторонні частинки, такі як бруд, жир, харчові відходи або побічні продукти їх розпаду. Дотримання промислових стандартів для застосувань з високим попитом, таких як упаковка, є складним завданням через ускладнення, що виникають через колір, запах та міграцію неідентифікованих органічних речовин [5]. Для зменшення кількості забруднюючих речовин використовувалися різні методи очищення, такі як екстракція за допомогою поліетиленгліколю, екстракція гарячою водою з гідроксидом натрію, екстракція субкритичною водою, окислення ультрафіолетовим випромінюванням та поглиблене окислення з використанням ультрафіолетового випромінювання з  $\text{H}_2\text{O}_2$  [6]. Після збору пластикові відходи



проходять попереднє промивання в резервуарі для видалення поверхневих важких домішок. Крім того, гаряча вода або стиснене повітря ефективно видаляють жирне сміття та наклейки. Пахучі компоненти пластикових відходів частково видаляються за допомогою промивки каустичною содою, тоді як для видалення найбільш неполярних компонентів потрібні органічні розчинники та мийні засоби [7-8]. Мийні засоби також використовуються під час процесу механічного очищення для досягнення повної деконтамінації.

Поліетиленові (ПЕ) плівки становлять найбільшу частку гнучкої упаковки, однак їх механічний рециклінг ускладнюється високою контамінацією побутовими/ харчовими залишками, адгезивами, друкарськими фарбами, клеями, а також вологою й тонкодисперсними твердими домішками, що знижує вихід і якість грануляту та обмежує сфери повторного застосування. У промислових лініях очищення ПЕ-плівки критичною є мийна стадія з використанням поверхнево-активних речовин (ПАР), мета яких — знизити поверхневий натяг, поліпшити змочуваність і солюбілізацію органічних забруднювачів, диспергувати тверді частки та сприяти їх видаленню без пошкодження полімерної матриці. Правильний вибір складу ПАР, температури, рН і тривалості миття безпосередньо впливає на колірну стабільність, леткі домішки/запах, реологію розплаву та механічні властивості вторинного ПЕ, а також на економіку процесу через витрати на воду й очищення стоків. З огляду на зростання ринку вторинних плівок і вимог до якості, оптимізація саме мийно-очисних операцій із застосуванням ПАР є ключем до підвищення товарності рециклата з ПЕ-плівок.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автори [1] розглядають роль ПАР у мийному контурі. ПАР у лужних/нейтральних мийних ваннах забезпечують змочування ПЕ-плівки, емульгування жирів/олій, десорбцію фарб і клеїв та стабілізацію зважених речовин; оптимальні умови включають підвищення температури, контроль рН та концентрацію ПАР вище критичної концентрації міцелоутворення, що підвищує швидкість і повноту деконтамінації без надмірної деградації полімеру. Дослідження ефективності миття для різних полімерів, включно з поліетиленом низького тиску, показують зростання вилучення слабополярних забруднювачів із підвищенням температури й часу; використання лугів/детергентів може покращувати видалення полярних компонентів, але потребує контролю, аби уникати небажаних змін маси/летких фракцій і появи запахів.

Автори [3] пропонують конфігурацію мийної установки для дослідження параметрів мийного процесу для різних видів пластику та рецептур, під час використання якої доходять висновків, що підвищення температури покращує мийний ефект.

Автори [9] за результатами огляду технологічних стратегій для переробки «брудних» ПЕ-плівок роблять висновок про те, що інтенсифіковані мийні/флотаційні схеми з детергентами забезпечують істотне зменшення залишкових органічних домішок і фарб, тоді як просте водне миття є недостатнім; водночас надмірна лужність і тривале миття можуть призводити до небажаних змін у масі зразка через можливу деструкцію, що потребує балансу між чистотою і збереженням властивостей. Практичний висновок — для ПЕ-плівок доцільні гарячі мийні ванни з ПАР і контрольованим лужним компонентом, з наступним ретельним полосканням, щоб мінімізувати залишковий вміст ПАР та вплив на запах/леткі речовини.

Автори [10] досліджують специфіку забруднень плівкових потоків. Аналітичні звіти для гнучких плівок у ЄС фіксують, що відсортовані тюки ПЕ-плівки містять значну частку не-ПЕ полімерів і забруднень: у побутових потоках вміст чистого ПЕ може бути  $\leq 70\%$ , у комерційних — близько  $85\%$ , в агроплівках — близько  $50\%$ , причому агроплівки містять ґрунт, органіку, вологу та залишки агрохімікатів; це прямо підвищує навантаження на мийні стадії і визначає потребу у ПАР для ефективного очищення. За таких умов вибір рецептур ПАР і режимів (температура, інтенсивність механічного впливу, тривалість) критично впливає на реальний вихід придатного рециклата та його колір/запах.

Автори [11] пропонують протоколи придатності до рециклінгу ПЕ-плівок і обмеження щодо хімії миття. Актуалізовані європейські протоколи оцінювання придатності до рециклінгу ПЕ-плівок (RecyClass REP-PEflex-01) детально регламентують лабораторну перевірку інноваційної упаковки з урахуванням реальних стадій передоброблення (миття, флотація, сушіння) та подальшої екструзії/видування, наголошуючи, що промислові мийні операції для ПЕ-плівок зазвичай використовують «м'які» умови та уникають агресивних реагентів, аби не погіршити якість рециклата і не ускладнювати очищення стоків. Це підкреслює необхідність відбору ПАР із доказовою ефективністю деінкінг/видалення клеїв при помірних температурах і рН, сумісних зі стандартними лініями механічного рециклінгу ПЕ-плівок.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Сукупно наукові та галузеві джерела узгоджено демонструють: для поліетиленових плівок найвагоміший важіль підвищення якості рециклата — оптимізовані мийні схеми з ПАР, адаптовані до профілю забруднень і обмежень очисних споруд; це дозволяє підвищити вихід придатної фракції, стабілізувати колір/запах і покращити перероблюваність вторинного ПЕ. Тому правильний підбір мийних засобів та умов мийки полімерних відходів у процесі їх механічного рециклінгу залишається актуальним завданням для одержання якісного рециклату.

**Мета цієї роботи** — підбір мийних засобів для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену на основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу.

**Виклад основного матеріалу.** Для досліджень використали серію продуктів Plurafac® (BASF, Німеччина), зокрема:

Plurafac® LF 120 (CAS No. 111905-52-3) — неіоногенна поверхнево-активна речовина, що складається з алкоксильованих, переважно нерозгалужених жирних спиртів і містить вищі алкеноксиди поряд з етиленоксидом. Дуже ефективний змочувальний агент. Розчиняється у воді та органічних розчинниках. Пропонується виробником для миття посуду, прання і прибирання.

Plurafac® LF 220 (CAS No. 111905-53-4) — суміш розгалужених та лінійних спиртів з довжиною ланцюга від 13 до 15 атомів вуглецю, до яких приєднані бутоксидні та етоксидні групи. Завдяки своїм властивостям може застосовуватися як основний ПАР у засобах для миття посуду в посудомийках та ополіскувачах, має хороші емульгуючі властивості, а також непогану змочувальну здатність.

Plurafac® LF 221 — неіоногенна поверхнево-активна речовина з низьким рівнем піноутворення, що складається з алкоксильованих, переважно нерозгалужених жирних спиртів і містить вищі алкеноксиди поряд з етиленоксидом. Пропонується виробником для миття посуду, прання і прибирання, для догляду за автомобілем.

Plurafac® SLF 180 (CAS No. 166736-08-9) — поверхнево-активна речовина з низьким піноутворенням. Внесена до списку безпечних хімічних інгредієнтів Агентства з охорони навколишнього середовища США (EPA). Підходить для низькотемпературного очищення.

Disponil® ENS 47 (CAS No. 126-92-1) — аніонна поверхнево-активна речовина, натрієва сіль 2-етилгексилсульфату, що використовується як емульгатор у виробництві полімерних емульсій, а також для посилення мийних властивостей у складах для очищення твердих поверхонь; підвищує змочувальну та проникну здатність мийних засобів, і може застосовуватися в різних галузях, від автохімії до промислового використання.

Придатність тих чи інших поверхнево-активних речовин для використання в технологіях механічного рециклінгу оцінювали шляхом визначення і порівняння вмісту активної миючої речовини, рН, здатності до піноутворення і піностійкості; також через визначення поверхневого натягу, точки помутіння і змочувальної здатності. Саме ці показники зазвичай беруться до уваги при розробці рекомендацій щодо застосування ПАР в технологіях механічного рециклінгу [12-13].

*Якісна реакція на визначення природи поверхнево-активних речовин*

У колбу вносять 1 мл досліджуваного розчину ПАР, кілька крапель індикатору метилового червоного та з бюретки додають розчин розведеної 1:3 хлоридної кислоти до зміни забарвлення розчину. Фіксують об'єм витраченої кислоти. У другу колбу відбирають 1 мл досліджуваного розчину ПАР, додають зафіксований об'єм кислоти, перемішують і додають 1 мл розчину реактиву – роданатокобальтату амонію.

Якщо в досліджуваному розчині ПАР присутня аніонактивна ПАР або взагалі це не ПАР, розчин у колбі забарвлюється в рожевий колір; катіонактивна ПАР – розчин у колбі стає мутним і забарвлюється в блакитний колір; неіоногенна ПАР – розчин у колбі забарвлюється в зеленкувато-блакитний або блакитний колір.

*Визначення вмісту сухого залишку ПАР*

У зважений бюкс на аналітичних вагах зважують наважку мийного засобу близько 10 г, висушують у сушильній шафі при температурі 85–90 °С до постійної маси. Вміст сухого залишку визначають за формулою, %:

$$x = \frac{a}{H} \cdot 100\%,$$

де  $a$  – маса сухої речовини після висушування бюкса, г;  $H$  – наважка ПАР, г.

*Визначення вмісту активної мийної речовини*

Близько 1 г мийного засобу, зваженого на технічних вагах, переносять у колбу на 250 мл, додають 20 мл спирту і кип'ятять суміш зі зворотним холодильником протягом 30 хвилин. Після відстоювання рідини, розчин фільтрують у колбу місткістю 250–300 мл. Залишок у першій колбі оброблюють спиртом у кількості 10–15 мл ще два рази, кожного разу зливаючи через фільтр у ту ж саму колбу. Потім фільтрат переносять у доведену до постійної маси колбу і спирт відганяють. Колбу сушать при 80–90 °С до постійної маси. Вміст активної мийної речовини розраховують за формулою:

$$x = \frac{a}{H} \cdot 100\%,$$

де  $a$  – маса висушеного залишку, г;  $H$  – наважка мийного засобу, г.

*Визначення рН розчину ПАР*

рН розчинів ПАР визначали відповідно до ДСТУ EN 1262:2007 «Речовини поверхнево-активні. Метод визначання рН розчинів чи дисперсій». Готують 200 мл 1%-вого водного розчину ПАР з урахуванням вмісту сухого залишку. Для цього спочатку в стакані розчиняють наважку ПАР у 50 мл теплої (40–45 °С) дистильованої води, потім цей розчин необхідно перенести в мірну колбу на 100 мл, кілька разів змити стінки стакана дистильованою водою, причому промивні води також додати у мірну колбу. Об'єм розчину доводять до мітки й ретельно перемішують. З одержаного розчину відбирають пробу і визначають рН розчину потенціометричним методом.

*Дослідження піноутворення і піностійкості розчину ПАР*

Дослідження піноутворення і піностійкості розчинів поверхнево-активних речовин (ПАР) регламентує ДСТУ EN 13996:2009 «Речовини поверхнево-активні. Здатність і нездатність до піноутворення. Метод перемішування з використанням турбіни».

200 мл 1% розчину ПАР влийте через лійку в мірний циліндр (об'ємом 500 мл з ціною поділки – 1 мл) так, щоб струмінь мильного розчину не потрапляв на стінки циліндра. Відразу після виливання всього розчину зафіксуйте верхній рівень піни й верхній рівень розчину, що залишився під піною. Різниця цих показників характеризує піноутворення ( $\Pi_1$  у мл). Залиште циліндр з таким вмістом у спокійному стані на 5 хвилин, потім проведіть аналогічні розрахунки для визначення показника  $\Pi_2$ . Піностійкість ( $\Pi_{\text{ст}}$ ) розраховують за формулою:

$$\Pi_{\text{ст}} = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} \cdot 100\%.$$

*Визначення поверхневого натягу ПАР*

Величину поверхневого натягу досліджуваних ПАР визначали відповідно до ДСТУ EN 14370:2012 «Речовини поверхнево-активні. Методи визначення поверхневого натягу». Для визначення поверхневого натягу готують розчини ПАР з концентрацією 0,25–0,5 % (у розрахунку на вміст сухої речовини). Поверхневий натяг досліджуваного розчину  $\tau_1$  визначають таким чином: спочатку підраховують число крапель при витіканні дистильованої води  $N_0$ , а потім число крапель при витіканні досліджуваного розчину  $N_1$ . Поверхневий натяг розраховують за формулою:

$$\tau_1 = \frac{\tau_0 N_0 D_1}{N_1 D_0},$$

де  $\tau_0$  – поверхневий натяг води, дорівнює 72,75 дин/см;  $N_0$  – число крапель води;  $N_1$  – число крапель досліджуваного розчину;  $D_0$  – густина води, дорівнює 1 г/см<sup>3</sup>;  $D_1$  – густина досліджуваної речовини, г/см<sup>3</sup>.

*Визначення змочувальної здатності ПАР*

Змочувальну здатність ПАР визначали методом занурювання за ДСТУ ISO 8022:2006 «Поверхнево-активні речовини. Визначення змочувальної здатності методом занурювання». Готують 100 мл розчину ПАР з концентрацією 0,5 г/л. Із сукна вирізують зразки діаметром 3 см і на добу вміщують їх в ексікатор з хлористим кальцієм. Приготовлений розчин ПАР наливають у плоскодонні ємності діаметром 8–10 см і висотою 6–8 см. У ємності по черзі кладуть зразки сукна з одночасним запуском секундоміра. Після падіння зразка на дно ємності секундомір зупиняють. Змочувальна здатність ПАР характеризується середньоарифметичною тривалістю занурення усіх зразків. Допускається відхилення  $\pm 10$  %.

*Визначення точки помутніння ПАР*

Точка помутніння — це верхня температурна межа, за якої неіоногенні поверхнево-активні речовини (ПАР) починають випадати в осад, утворюючи каламуть. Вона пов'язана з припиненням міцелоутворення. В області температури помутніння спостерігається підвищена взаємна розчинність контактуючих рідких фаз, а в емульсійних системах має місце інверсія фаз. Цей показник визначали відповідно до ДСТУ EN 1890:2008. Речовини поверхнево-активні. Метод визначення точки помутніння неіоногенних поверхнево-активних речовин, одержуваних конденсацією етиленоксиду.

**Результати досліджень та їх обговорення.** За результатами досліджень (табл. 1), поверхнево-активні речовини серії Plurafac® характеризуються високим вмістом активної мийної речовини, на відміну від продукту Disponil® ENS 47, що забезпечить високу ефективність їх застосування за менших витрат. Поверхнево-активні речовини серії Plurafac® демонструють відмінні змочувальні властивості, кращі змочувальні властивості має продукт Plurafac® LF 120, що корелює з найнижчим значенням поверхневого натягу ПАР. Відповідно продукт Disponil® ENS 47, який має найвище значення показника поверхневого натягу, характеризується найгіршою змочувальною здатністю. Продукти Plurafac® SLF 180 і Disponil® ENS 47 характеризуються невисоким піноутворенням, тому можуть рекомендуватися для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях.

У літературі часто повідомляється про використання гідроксиду натрію та деяких рідких мийних засобів для видалення домішок [14–15] однак використання цих продуктів за певних умов очищення може призвести до деградації полімерів. Одночасне застосування гідроксиду натрію і рідких мийних засобів демонструє ефективність у видалення харчових органічних домішок із пластикової упаковки [16]. Зазвичай, рідкі мийні засоби, що використовуються в процесах очищення пластику після споживання, являють собою суміші тензоактивних агентів, функція яких полягає у зниженні поверхневого натягу розчину, що дозволяє емульгуватися оліям та жирам.

Таблиця 1 – Результати дослідження властивостей поверхнево-активних речовин

| Показник                           | Тип продукту      |                        |                   |                       |                    |
|------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
|                                    | Plurafac® LF 120  | Plurafac® LF 220       | Plurafac® LF 221  | Plurafac® SLF 180     | Disponil® ENS 47   |
| Консистенція ПАР, зовнішній вигляд | Не густа, прозора | Сиропоподібна, прозора | Не густа, прозора | Доволі густа, прозора | Рідка, прозора     |
| Колір                              | Безбарвна         | Блідо-кремовий         | Безбарвна         | Безбарвна             | Світло-жовтий      |
| Запах                              | Хімічний          | Хімічний               | Слабко-хімічний   | Слабко-хімічний       | Хімічний «Мильний» |
| Питома вага, г/см <sup>3</sup>     | 1,029             | 1,106                  | 1,088             | 1,088                 | 1,061              |
| Тип ПАР                            | неіоногенні       |                        |                   |                       | аніонна            |
| Сухий залишок, %                   | 98,0              | 94,3                   | 94,3              | 98,8                  | 45,2               |
| Вміст активної мийної речовини, %  | 97,8              | 94,3                   | 93,4              | 97,7                  | 44,2               |
| pH вихідного продукту              | 5,5               | 7,3                    | 7,5               | 8,0                   | 12,8               |
| pH розчину ПАР                     | 5,2               | 5,7                    | 6,3               | 6,0                   | 11,1               |
| Піноутворення, мл                  | 90                | 90                     | 95                | 50                    | 60                 |
| Піностійкість, %                   | 11,1              | 33,3                   | 15,8              | 10,0                  | 33,3               |
| Поверхневий натяг ПАР              | 27,98             | 30,31                  | 31,83             | 32,64                 | 70,73              |
| Змочувальна здатність, с           | 2,5               | 3,5                    | 2,9               | 3,8                   | 23,7               |
| Точка помутніння, °C               | 48                | 52                     | 48                | 18                    | –                  |

Джерело: розроблено авторами.

У зв'язку з цим, застосування Disponil® ENS 47 може бути ефективним у процесі мийки відходів, оскільки саме цей продукт має яскраво виражені лужні властивості, про що свідчить високе значення pH. Відповідно проявлятиме хорошу емульгуючу здатність для видалення харчових домішок з полімерних відходів. Також може рекомендуватися для посилення мийної здатності інших ПАР.

**Висновки.** Таким чином, на основі визначення властивостей поверхнево-активних речовин різного типу для застосування в технологіях механічного рециклінгу поліетилену можна рекомендувати продукт Disponil® ENS 47 для миття забруднених органічними домішками (рештками харчових продуктів) відходів поліетиленової плівки. Яскраво виражені лужні властивості цього продукту забезпечать швидке омилення жирів, а не висока здатність до піноутворення робить його придатним для застосування в комерційних мийних лініях. Найнижча температура в точці помутніння для Plurafac® SLF 180 дає можливість ефективного застосування цього продукту в низькотемпературних мийних лініях. Висока мийна здатність продукту Plurafac® LF 120 дає підстави рекомендувати цей продукт для мийки сильнозабруднених відходів поліетиленової плівки в технологіях механічного рециклінгу, зокрема при підвищеній температурі.

Правильний вибір складу ПАР, температури, pH і тривалості миття забезпечить колірну стабільність, потрібну реологію розплаву та механічні властивості вторинного ПЕ без сторонніх домішок і запахів. Це сприятиме розширенню сфери застосування вторинного грануляту.

#### Список використаних джерел

1. Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A. S., & Arjmand, M. (2025). Plastic recycling: Challenges and opportunities. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(8), 2462–2498. <https://doi.org/10.1002/cjce.25531>.
2. OECD. (2022). *Global plastics outlook: Policy scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.

3. Kruta, K., et al. (2023). Effect of different washing conditions on the removal of volatile organic compounds from polymers including LDPE. *Clean Technologies and Recycling*, 3(3), 134–147. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol303008>.
4. Wagner, S., & Schlummer, M. (2020). Plastic recycling: Technological and economic aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, Article 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>.
5. Ibarra, V. G., De Quirós, A. R. B., Losada, P. P., & Sendón, R. (2019). Migration of substances from multilayer plastic packaging and deinking of recycled polymer films. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, Article 100325. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100325>.
6. Núñez, S. S., Conesa, J. A., Molto, J., & Fullana, A. (2023). Characterization and valorization of plastic waste from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 195, Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107017>.
7. Roosen, M., De Somer, T., Demets, R., Ügdüler, S., Meesseman, V., Van Gorp, B., Ragaert, K., Van Geem, K. M., Walgraeve, C., & Dumoulin, A. (2021). Circular business models for plastic waste: Technical possibilities and barriers. *Waste Management*, 120, 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.017>.
8. Strangl, M., Ortner, E., Fell, T., Ginzinger, T., & Buettner, A. (2020). Odour profile changes of recycled polyethylene (PE) during storage. *Journal of Cleaner Production*, 260, Article 121104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121104>.
9. Soto, J. M., Martínez-Salvador, A., et al. (2020). Novel pre-treatment of dirty post-consumer polyethylene film: Washing process assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, Article 104946. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104946>.
10. Plastics Recyclers Europe, & Eunomia. (2020). *Flexible films market in Europe: State of play* (52 p.). Plastics Recyclers Europe. <https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/flexible-films-market.pdf>.
11. Yang, M., Jiang, X., Xiang, X., Qu, P., & Zhu, M. (2025). Recent developments in recycling of post-consumer polyethylene waste. *Green Chemistry*, 27(15), 3900–3948. <https://doi.org/10.1039/D4GC06566B>.
12. Azarmi, R., & Ashjarian, A. (2015). Type and application of some common surfactants. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(2), 632–640. <https://www.jocpr.com/articles/type-and-application-of-some-common-surfactants.pdf>.
13. Das, R., et al. (2024). A comprehensive review on the creation, description, and recent advances in the utilization of biobased polyhydroxy surfactants. *Journal of Chemistry*, 2024, Article 6120535. <https://doi.org/10.1155/2024/6120535>.
14. RecyClass. (2025). *Recyclability evaluation protocol for PE films (REP-PEflex-01)* (Version 6.0). Plastics Recyclers Europe/RecyClass. <https://recyclclass.eu/wp-content/uploads/2025/01/REP-PEflex-001-v.6.0.pdf>.
15. Santos, A. S. F., Santana, R. M. C., Agnelli, J. A. M., & Manrich, S. (2001). Characterization of low-density polyethylene after recycling. *Polymer Recycling*, 6(2), 57–68.
16. Santana, R. M. C., & Gondim, G. (2009). Influence of cleaning conditions on the degradation of recycled HDPE. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1454–1460. <https://doi.org/10.1002/app.29479>.

### References

1. Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A. S., & Arjmand, M. (2025). Plastic recycling: Challenges and opportunities. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 103(8), 2462–2498. <https://doi.org/10.1002/cjce.25531>.
2. OECD. (2022). *Global plastics outlook: Policy scenarios to 2060*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
3. Kruta, K., et al. (2023). Effect of different washing conditions on the removal of volatile organic compounds from polymers including LDPE. *Clean Technologies and Recycling*, 3(3), 134–147. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol303008>.

4. Wagner, S., & Schlummer, M. (2020). Plastic recycling: Technological and economic aspects. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, Article 104800. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104800>.
5. Ibarra, V. G., De Quirós, A. R. B., Losada, P. P., & Sendón, R. (2019). Migration of substances from multilayer plastic packaging and deinking of recycled polymer films. *Food Packaging and Shelf Life*, 21, Article 100325. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100325>.
6. Núñez, S. S., Conesa, J. A., Molto, J., & Fullana, A. (2023). Characterization and valorization of plastic waste from municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 195, Article 107017. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107017>.
7. Roosen, M., De Somer, T., Demets, R., Ügdüler, S., Meesseman, V., Van Gorp, B., Ragaert, K., Van Geem, K. M., Walgraeve, C., & Dumoulin, A. (2021). Circular business models for plastic waste: Technical possibilities and barriers. *Waste Management*, 120, 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.017>.
8. Strangl, M., Ortner, E., Fell, T., Ginzinger, T., & Buettner, A. (2020). Odour profile changes of recycled polyethylene (PE) during storage. *Journal of Cleaner Production*, 260, Article 121104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121104>.
9. Soto, J. M., Martínez-Salvador, A., et al. (2020). Novel pre-treatment of dirty post-consumer polyethylene film: Washing process assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, Article 104946. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104946>.
10. Plastics Recyclers Europe, & Eunomia. (2020). *Flexible films market in Europe: State of play* (52 p.). Plastics Recyclers Europe. <https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2022/10/flexible-films-market.pdf>.
11. Yang, M., Jiang, X., Xiang, X., Qu, P., & Zhu, M. (2025). Recent developments in recycling of post-consumer polyethylene waste. *Green Chemistry*, 27(15), 3900–3948. <https://doi.org/10.1039/D4GC06566B>.
12. Azarmi, R., & Ashjarian, A. (2015). Type and application of some common surfactants. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 7(2), 632–640. <https://www.jocpr.com/articles/type-and-application-of-some-common-surfactants.pdf>.
13. Das, R., et al. (2024). A comprehensive review on the creation, description, and recent advances in the utilization of biobased polyhydroxy surfactants. *Journal of Chemistry*, 2024, Article 6120535. <https://doi.org/10.1155/2024/6120535>.
14. RecyClass. (2025). *Recyclability evaluation protocol for PE films (REP-PEflex-01)* (Version 6.0). Plastics Recyclers Europe/RecyClass. <https://recyclclass.eu/wp-content/uploads/2025/01/REP-PEflex-001-v.6.0.pdf>.
15. Santos, A. S. F., Santana, R. M. C., Agnelli, J. A. M., & Manrich, S. (2001). Characterization of low-density polyethylene after recycling. *Polymer Recycling*, 6(2), 57–68.
16. Santana, R. M. C., & Gondim, G. (2009). Influence of cleaning conditions on the degradation of recycled HDPE. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(3), 1454–1460. <https://doi.org/10.1002/app.29479>.

Дата першого надходження статті до видання: 24.11.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 07.12.2025



**Oleg Lozovyi<sup>1</sup>, Viktoriia Plavan<sup>2</sup>, Serhii Tytarenko<sup>3</sup>, Olena Okhmat<sup>4</sup>,  
Yevhen Zaitsev<sup>5</sup>, Olena Kryukova<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>Postgraduate student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [o.lozovoy@biosphere-corp.com](mailto:o.lozovoy@biosphere-corp.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0001-2228-9058>

<sup>2</sup>Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [plavan.vp@knuutd.edu.ua](mailto:plavan.vp@knuutd.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

**ResearcherID:** I-5852-2015. **SCOPUS Author ID:** 6603130130

<sup>3</sup>Postgraduate student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [tytarenko.ss@knuutd.edu.ua](mailto:tytarenko.ss@knuutd.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6307-4482>

<sup>4</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Leather and Fur Biotechnology  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [oxmat.aa@knuutd.edu.ua](mailto:oxmat.aa@knuutd.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0927-8706>

**Scopus Author ID:** 57194089217

<sup>5</sup>Master's student of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [ktpthv@knuutd.edu.ua](mailto:ktpthv@knuutd.edu.ua)

<sup>6</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technologies and Resource Conservation  
Kyiv National University of Technologies and Design (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [kryukova.aa@knuutd.edu.ua](mailto:kryukova.aa@knuutd.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8638-3580>

**SCOPUS Author ID:** 24335433200

## **SELECTION OF SURFACE-ACTIVE AGENTS FOR APPLICATION IN MECHANICAL RECYCLING TECHNOLOGIES OF POLYETHYLENE**

*Recycling of polymeric materials initiates following waste collection and comprises multiple processing stages: sorting, decontamination (washing), comminution, consolidation, and reprocessing. Within the context of mechanical plastic waste recycling, the decontamination stage represents a critical operation. The presence of contaminants can result in quality degradation of the recycled product and diminish its commercial value. Polyethylene (PE) films constitute the predominant fraction of flexible packaging materials; however, their mechanical recycling is hindered by substantial contamination levels, including food residues, adhesive remnants, printing pigments, adhesive agents, moisture, and fine particulate impurities. In industrial-scale PE film washing circuits, the detergent washing operation employing surface-active substances (surfactants) is essential. This work addresses the selection of washing formulations intended for polyethylene mechanical recycling technologies. Through comprehensive characterization of various surfactant types, Disponil® ENS 47 is recommended for decontamination of polyethylene film waste bearing organic fouling (food-derived residues). The marked alkaline character of this formulation facilitates efficient fat saponification, while its limited foaming tendency renders it compatible with industrial-scale washing installations. The minimal cloud point exhibited by Plurafac® SLF 180 permits its effective deployment in low-temperature washing operations. The superior detergency of Plurafac® LF 120 supports its recommendation for intensive treatment of heavily fouled polyethylene film waste in mechanical recycling systems, notably under elevated temperature conditions. Optimization of surfactant formulation, temperature, pH, and residence time will achieve satisfactory color permanence, appropriate melt rheological behavior, and mechanical performance of secondary PE, free from residual contaminants and odoriferous compounds. Such optimization will enable broadened application scope for secondary polymer pellets.*

**Keywords:** surfactants, mechanical recycling, polyethylene waste, cleaning performance.

**Fig.:** 1. **Table:** 1. **References:** 16.