

ISSN 2079-1747 (print)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

МАШИНОБУДУВАННЯ

Випуск 37

ENGINEERING

Issues 37

Харків
Kharkiv
2026

Засновник і видавець
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України

Наукове фахове видання України Категорії «Б» з галузі наук G Інженерія, виробництво та будівництво:
G6 Інформаційно-вимірювальні технології, G8 Матеріалознавство,
G9 Прикладна механіка, G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)
(накази МОН України №409 від 17.03.2020, №320 від 07.04.2022,
зі змінами наказ МОН України № 349 від 24.02.2025)

Засновано у 2007 році
Періодичність виходу – 2 рази на рік

УДК 621+624+681.5+006.9

У збірнику подано результати наукових досліджень у галузі механічної обробки сучасних матеріалів із застосуванням високопродуктивних технологій, високоефективних ріжучих інструментів, нових методів і вимірювальних приладів для контролю якості, метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Для науковців, аспірантів, викладачів, фахівців у галузі прикладної механіки, матеріалознавства, галузевого машинобудування, інформаційно-вимірювальних технологій.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол 9 від 25.05.2026 р.)

Редакційна колегія:

Купріянов О. В., д.техн.н., проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (головний редактор);
Грінченко Г. С., к.техн.н., доц., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (відповід. редактор);
Александрова Т. Є., д.техн.н., проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
Бовдуй І. В., к.техн.н., ст.наук.співроб., Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України;
Бондаренко М. О., д.техн.н., проф., Черкаський державний технологічний університет;
Васілевський О. М., д.техн.н., проф., Техаський університет в Остіні, США;
Волошко О. В., к.техн.н., ст.наук.співроб., Інститут енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України;
Дишев Димитар, доктор наук, проф., Технічний університет Габрово, Болгарія;
Дьяков Димитар, Ph.D., проф., Софійський технічний університет, Болгарія;
Дядюра К. О., д.техн.н., проф., Національний університет «Одеська політехніка»;
Едл Мілан, Ph.D., декан, Університет Західної Богемії, Чеська Республіка;
Канюк Г. І., д.техн.н., проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна;
Куценко О. С., доктор наук, проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;
Ларшин В. П., д.техн.н., проф., Національний університет «Одеська політехніка»;
Федін С. С., д.техн.н., проф., Національний транспортний університет;
Шабатура Ю. В., д.техн.н., проф., Національна академія сухопутних військ;

Адреса редакційної колегії: майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна
Тел. (057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua, сайт: <https://periodicals.karazin.ua/engineering> (OJS)

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за достовірність наведених фактів, імен тощо.

Статті пройшли подвійне «сліпе» рецензування

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-02387 (Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1820 від 21.12.2023 р. протокол № 31, № 121 від 09.01.2025 протокол №1)

© Харківський національний університет імені
В. Н. Каразіна, оформлення, 2026

Founder and Publisher
V.N. Karazin Kharkiv National University
Ministry of Education and Science of Ukraine

The Collection is a of Scientific Works in the field of sciences G Engineering, manufacturing and construction:
G6 Information and measurement technologies, G8 Materials science,
G9 Applied mechanics, G11 Mechanical engineering (by specialization),
(orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 409 dated March 17, 2020; No. 320 dated April 07, 2022;
as amended Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 349 dated February 24, 2025.

Established in 2007
Published 2 times a year

UDC 621+624+681.5+006.9

The collection presents the results of scientific research in the field of manufacturing of modern materials using high-performance technologies, new methods and measuring devices for quality control of machined surfaces and high-performance cutting tools, metrology and measuring technology.

For scientists, postgraduate students, teachers, specialists in the field of applied mechanics, materials science, industrial mechanical engineering, information and measurement technologies.

Approved for printing by the decision of the Academic Council of V. N. Karazin Kharkiv National University
(Minutes Nr 9, dated May 25, 2026)

The Editorial Board:

Editor-in-Chief: **Kupriyanov O. V.**, D.Sc., Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Executive Editor: **Hrinchenko H. S.**, Ph.D., Assoc. Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Aleksandrova Tetyana, D.Sc., Prof., National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
Bovdui Igor, Ph.D., Senior Research Scientist, A. Pidhornyi institute of power machines and systems of NASU, Ukraine;
Bondarenko Maksym, D.Sc., Prof., Cherkasy State Technological University, Ukraine;
Vasilevskyi O. M., D.Sc., Prof., The University of Texas at Austin, US;
Voloshko Olena, Cand. Sc. (Eng.), Res. A. Pidhornyi institute of power machines and systems of NASU, Ukraine;
Dichev Dimitar, D.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Bulgaria;
Diakov Dimitar, Ph.D., Prof., Technical University of Sofia, Bulgaria;
Dyadyura Kostiantyn, D.Sc., Prof., Odessa Polytechnic National University, Ukraine;
Edl Milan, Ph.D., Assoc. Prof., University of West Bohemia, Czech Republic;
Kanyuk Gennady, D.Sc., Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Kutsenko Oleksandr, D.Sc., Prof., National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
Larshin Vasily, D.Sc., Prof., Odessa Polytechnic National University, Ukraine;
Fedin Serhii, D.Sc., Prof., National Transport University, Ukraine;
Shabatura Yuriy, D.Sc., Prof., National Army Academy, Ukraine;

Editorial Board Address: Svobody Sq., 4, 61022, Kharkiv, Ukraine; V.N. Karazin Kharkiv National University,
Educational and Research Institute “Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy”.
Tel (057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua web: <https://periodicals.karazin.ua/engineering> (OJS)

The authors of the published materials are solely responsible for the selection, accuracy of the facts, proper names, etc

Double-Blind Peer Review Was Conducted.

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-02387 (Decision of the National Council of
Television and Radio Broadcasting of Ukraine № 1820 dated December 21, 2023 Protocol № 31,
№ 121 dated January 09 2025 Protocol №1)

© *V.N. Karazin Kharkiv National University,*
design, 2026

ЗМІСТ

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Грінченко Г.С., Лисенко А.Я. Кваліметричне оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС на основі ризик-орієнтованого підходу	6
Артюх С. М., Артюх А. В., Князева В. М. Методи оцінки та забезпечення метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем	24
Бровко К.Ю., Буданов П.Ф., Войтенко С. М., Винокурова Н.Д., Великогорський О. В. Лабораторне обладнання Festo як інструмент експериментального моделювання електротехнічних систем енергоблоків АЕС	32
Кирисов І.Г., Мельников В.Є., Буданов М.П., Пономаренко О.М. Дослідження кількісних та якісних параметрів моделі сонячного елемента	49
Прокопенко О.О., Антоненко Н.С., Тюпа І., Халімов Д.В., Халімов П.В., Юречко Д.О. Статистичні методи нормування вібрації газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу експлуатаційних даних	64
Канюк Г. І., Єпик О. М. Аналіз показників якості теплоізоляційних матеріалів та методів їх підвищення	77
Мезеря А. Ю., Фурсова Т. М., Близниченко О. М., Малюта В. Є., Толсторебров О. Т. Аналіз впливу показників якості на ефективність роботи енергетичного обладнання електростанцій	87
Ключка Є. П., Вітер В. С. Аналіз показників якості електроенергії та нормативного забезпечення щодо їх підвищення на електростанціях традиційного та поновлювального типів	97

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Шофул К. А., Ісіченко О. О. Особливості шліфування заготовок із цементованих сталей	106
---	-----

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

Кириченко І. Г., Гурко В. О. Математична модель електрогідروприводу робочого обладнання фронтального навантажувача для інформаційно-керуючого комплексу	116
Писарцов О.С. Порівняльне дослідження характеристик опорної взаємодії літніх і зимових пневматичних шин типорозміру 225/55 R18 залежно від внутрішнього тиску	126
Вольченко О. І., Возний А. В., Вудевуд О. М., Семеній О. М., Андрейчиков Є. Ю. Проектування ефективного камерного дисково-колодкового гальма	137
Супонєв В.М., Рагулін В.М., Тхорук Є.І., Кравець С. В., Лемець О.О., Куліков М.О. Рівняння траєкторії руху головки в ґрунті з умови її корекції та їх експериментальна перевірка	153
Фідоровська Н. М., Смирнов І. П., Чернишенко О. В., Штода В. С., Поляков О. А. Визначення напружень в лобовині канатного барабана	164

CONTENTS

INFORMATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES

<i>Hrinchenko H. S., Lysenko A. Ya</i> Qualimetric assessment of the performance quality of a nuclear power plant unit based on a risk-oriented approach	6
<i>Artiukh S., Artiukh A., Kniazieva V.</i> Methods for evaluating and ensuring the metrological reliability of information and measurement systems	24
<i>Brovko K., Budanov P., Vynokurova N., Voitenko S., Velykohorskyi O.</i> Festo Laboratory Equipment as a Tool for Experimental Modeling of Electrical Systems of NPP Power Units	32
<i>Kyrysov I., Melnykov V., Budanov M., Ponomarenko O.</i> Research of quantitative and qualitative parameters of the solar cell model	49
<i>Prokopenko O., Antonenko N., Tupa I., Khalimov D., Khalimov P., Yurechko Dmytro</i> Statistical Normalization of Vibration Velocity in Gas Compressor Units Based on Operational Data Analysis	64
<i>Epik O., Kanjuk G.</i> Analysis of quality indicators of thermal insulation materials and methods for their improvement	77
<i>Mezerya A., Fursova T., Bliznichenko O., Maliuta V., Tolstorebrov O.</i> Analysis of the impact of quality indicators on the operational efficiency of power plant energy equipment	87
<i>Kliuchka Y., Viter V.</i> Analysis of electricity quality indicators and regulatory support for their improvement at traditional and renewable power plants	97

MATERIALS SCIENCE

<i>Skorkin A., Kondratyuk O., Shoful K., Isichenko O.</i> Features of grinding of blanks from cemented steel	106
--	------------

MECHANICAL ENGINEERING (BY SPECIALIZATION)

<i>Kyrychenko I., Hurko V.</i> Mathematical model of the electro-hydraulic drive of the working equipment of a wheel loader for an information and control system	116
<i>Pysartsov O.</i> Comparative study of the support interaction characteristics of summer and winter pneumatic tires of size 225/55 r18 depending on internal pressure	126
<i>Volchenko O.I., Voznyi A., Vudvud O., Semenyi O., Andreychikov Ye.</i> Design of an efficient chambered disc-pad brake	137
<i>Suponyev V., Ragulin V., Tkhoruk Y., Kravets S., Lemets O., Kulikov M.</i> Equations of the trajectory of the head's motion in the ground with the condition of its correction and their experimental verification	153
<i>Fidrovska N. M., Smirnov I. P., Chernishenko O. V., Shtoda V. S., Poliakov O. A.</i> Determination of tensions in the blood of the rope drum	164

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01>

УДК 658.62.018.012

¹ГРІНЧЕНКО Г. С., кандидат технічних наук,

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

¹ЛИСЕНКО А. Я.,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: dagost@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3916-8029>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

КВАЛІМЕТРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГОБЛОКУ АЕС НА ОСНОВІ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

Стаття присвячена актуальній науково-практичній проблемі розроблення та обґрунтування методичного підходу до комплексного оцінювання якості функціонування енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). В умовах зростання вимог до ядерної безпеки та необхідності подовження термінів експлуатації енергообладнання, традиційні методи, що базуються на окремих техніко-економічних показниках, виявляються недостатніми для адекватного відображення стану складних технічних систем. Авторами запропоновано інтеграцію кваліметричних методів аналізу з принципами ризик-орієнтованого підходу, що дозволяє не лише фіксувати поточні параметри системи, але й враховувати потенційні загрози та синергетичні ефекти їх взаємодії. У роботі проведено критичний аналіз наукових підходів до забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС в Україні та світового досвіду застосування багатокритеріального аналізу (MCDA) в енергетиці. Виявлено, що ключовою проблемою є відсутність єдиної методології, яка б поєднувала кількісні технічні параметри з якісними характеристиками, такими як культура безпеки чи організаційна ефективність. На основі системного підходу сформовано багаторівневу систему з 49 показників, структурованих за сімома категоріями: технічні, економічні, соціальні, організаційні, етичні, інформаційні та екологічні. Особливістю системи є її адаптивність до внутрішніх (модернізація, кадри) та зовнішніх (кіберзагрози, нормативні зміни) чинників. Методологічна частина дослідження описує процес визначення вагомості показників із застосуванням експертних груп та статистичних методів. Для підвищення об'єктивності оцінок запропоновано використання медіанних значень та моди, що дозволяє нівелювати вплив аномальних експертних думок. Важливим науковим результатом є застосування графового підходу для моделювання взаємозв'язків між показниками. Побудована орієнтована графова модель та матриця суміжності дозволяють ідентифікувати «вузлові» параметри, зміна яких спричиняє каскадний вплив на безпеку всього енергоблоку. Інтерпретація результатів моделювання вказує на те, що якість функціонування АЕС є функціональною залежністю від поточного стану та сукупності асоційованих ризиків. Запропонований підхід забезпечує наукове підґрунтя для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо модернізації обладнання та управління експлуатаційним ресурсом, враховуючи нелінійний характер взаємодії факторів у системах підвищеної небезпеки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: атомна електростанція, енергоблок, кваліметричне оцінювання, ризик-орієнтований підхід, інтегральний показник якості, експлуатаційна безпека, графова модель.

Як цитувати: Грінченко Г. С., Лисенко А. Я. Кваліметричне оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС на основі ризик-орієнтованого підходу. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 6-23.
<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01>



Вступ

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується зростанням вимог до надійності, безпеки та ефективності функціонування складних технічних систем, зокрема енергоблоків атомних електростанцій (АЕС). В умовах підвищеної техногенної небезпеки, жорстких регуляторних вимог та необхідності забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору особливого значення набуває впровадження науково обґрунтованих підходів до оцінювання якості функціонування таких об'єктів, що супроводжується рядом факторів, як зовнішнього, так і внутрішнього впливу, і які необхідно врахувати при плануванні стратегії управління енергоблоками АЕС.

Сучасні підходи до оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС в Україні переважно базуються на вико- ристанні окремих техніко-економічних або експлуатаційних показників, які характери- зують технічний стан та стабільність функціонування певного обладнання, виз- начають критерій і об'єкти моніторингу при модернізації та перепризначенні термінів експлуатації, враховують обмежений пере- лік індикаторів що на пряму має вплив на безпеку експлуатації АЕС, спрямовані на енергоефективність, як основний показник функціонування, тощо [1-5]. Такі підходи забезпечують регуляторні вимоги, що вису- ваються міжнародними організаціями з забезпечення атомного регулювання, націо- нальними нормами у сфері енергетичної

безпеки та внутрішніми документами з проведення робіт і забезпечення безпеки на АЕС, але при цьому не дозволяють повною мірою врахувати багатофакторний характер їх функціонування та часто не інтегрують показники ризику, що є критично важливим для об'єктів підвищеної небезпеки, врахування яких особливо важливо при розробці ефективних механізмів управління енергоблоком з точки зору складної технічної системи.

Для розробки ефективних механізмів управління енергоблоком АЕС перс- пективним напрямом є застосування кваліметричних методів, які дозволяють здійснювати комплексне оцінювання якості функціонування технічних систем шляхом формування інтегральних показників на основі сукупності часткових критеріїв. Водночас сучасні тенденції розвитку управління технічними системами передбачають активне впровадження ризик- орієнтованого підходу, який базується на ідентифікації, аналізі та врахуванні потенційних загроз і невизначеностей. Поєднання кваліметричного підходу з принципами управління ризиками відкриває нові можливості для підвищення об'єктивності, достовірності та практичної значущості оцінювання якості функціону- вання енергоблоків АЕС, що дозволяє не лише оцінити поточний стан системи, але й врахувати потенційні ризики її функціону- вання, що є важливим для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика оцінювання ефективності та сталості функціонування енергетичних систем, зокрема з урахуван- ням ризиків, активно досліджується в сучасній науковій літературі. Одним із ключових напрямів є розвиток багаток- ритеріальних підходів до оцінювання енергетичних систем, що дозволяють інтегрувати технічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Зокрема, у роботах [6,7] проаналізовано та запропоновано інтегрований багатокритеріальний підхід до оцінювання енергетичного переходу в країнах ЄС, який базується на використанні широкого спектра індикаторів та методів

зважування, що враховує сучасні виклики, які спричинені зміною клімату, глобальним потеплінням, викидами парникових газів та іншими причинами, що спонукали країни усього світу до переходу на низьковуг- лецеві енергетичні системи. В результаті систематичного огляду літератури авторами було визначено сімнадцять викликів, які було класифіковано за п'ятьма групами: економічні, інституційні, технічні, соціальні та екологічні. Згодом було обрано п'ятдесят три показники для вимірювання ефектив- ності ЄС у подоланні викликів. Крім того, для визначення суб'єктивної ваги виявлю- них викликів було застосовано метод

Ферма «Покроковий аналіз коефіцієнтів оцінки ваги», тоді як для визначення об'єктивної ваги обраних показників було застосовано метод, заснований на ефектах видалення критеріїв. Після цього було застосовано метод «Техніка визначення порядку переваг за схожістю з ідеальним рішенням» для оцінки ефективності дій ЄС у вирішенні викликів переходу до низьковуглецевої енергетики у 2015 та 2020 роках. Результати показали, що енергетична справедливість, витрати на пом'якшення наслідків, землекористування та відсутність інфраструктури є найважливішими соціальними, економічними, екологічними, інституційними та технічними викликами. Такий підхід показав цікаві результати в оцінюванні країн, та дав більш точну оцінку дійсної картини та перспектив подальшого розвитку енергетичного сектору, та може бути основою для оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС.

Планування та оцінювання технічних систем шляхом застосування ризик-орієнтованих підходів широко застосовується у практиці та наукових дослідженнях, а також є частиною системи управління якістю згідно міжнародних стандартів [8, 9], що створює сприятливу основу для активного впровадження цих підходів на підприємствах і організаціях різного рівня. Водночас значна увага в наукових роботах приділяється застосуванню ризик-орієнтованих підходів у плануванні та оцінюванні енергетичних систем і показано, що ризики в даних системах мають багатовимірний характер і включають технічні, економічні, політичні та соціальні компоненти, а для їх оцінювання використовуються як кількісні методи (стохастичне моделювання, Monte Carlo), так і напівкількісні (багато критеріальний аналіз, сценарні підходи) [10-14]. Разом з тим, сучасні дослідження також акцентують увагу на необхідності інтеграції різних груп показників у єдині системи оцінювання. Зокрема, у роботах, присвячених оцінюванню сталості енергетичних технологій, підкреслюється, що традиційні підходи (наприклад, LCA) не забезпечують повного врахування всіх аспектів сталості, що зумовлює необхідність розроблення інтегрованих методологій оцінювання [15-17].

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені використанню

багатокритеріального аналізу (MCDA) для оцінювання енергетичних систем, який MCDA дозволяє ефективно поєднувати різноманітні показники та формувати інтегральні оцінки, однак вибір індикаторів і методів зважування залишається складним науковим завданням [18-20]. Так в роботі [18] наведено сфери застосування методу багатокритеріального аналізу прийняття рішень, та підтверджено дієвість цього методу для підтримки прийняття рішень у сфері енергетики та оцінці стійкості енергетичних технологій та систем в рамках Асоціації Гельмгольца - мережі німецьких дослідницьких центрів, що займаються важливими темами, від досліджень раку до полярної науки. Однак, суттєвим недоліком методу багато критеріального аналізу прийняття рішень, відсутність чітких рекомендацій щодо вибору найбільш підходящого підходу до визначення критеріїв, а саме ранжування, сортування, вибору та кластеризації альтернатив (наприклад, технологій або сценаріїв), що підлягають оцінці [19, 20]. Для застосування методу багато критеріального аналізу, автори [20] зазначають необхідність чіткого представлення як обирати та визначати критерії й індикатори, які методи інтерпретації застосовувати, як визначати вагові коефіцієнти та не обхідність управління невизначеністю, вирішення питання несумісності, компенсації та несумісності критеріїв, тобто, огляд показує необхідність підвищення методологічної прозорості, наприклад, надання інформації про те, як обиралися альтернативи, критерії та індикатори і чому певні методи обираються на користь інших. Крім того, рекомендується, щоб при проведенні багатокритеріальних оцінок використовувалися методи інтерпретації, які передбачають несумісність або слабку сумісність критеріїв, з метою дотримання плюралізму цінностей сталого розвитку та дотримання концепції сильного сталого розвитку. Вибір вагових коефіцієнтів, є окремим питанням деяких робіт, так в роботі [21] запропоновано підхід до оцінювання ризиків енергетичних систем на основі комбінованих вагових коефіцієнтів (ентропійний метод, CRITIC) та методу TOPSIS, що дозволяє підвищити об'єктивність результатів оцінювання.

Сучасні дослідження також підкреслюють важливість урахування ризиків у забезпеченні енергетичної безпеки та надійності систем, а саме, що формування системи індикаторів енергетичної безпеки повинно базуватися на комплексному врахуванні загроз та невизначеностей функціонування енергетичних систем [22]. Авторами представлено методологію оцінки енергетичної безпеки з точки зору стійкості енергетичної системи до збурень, яка слугує комплексною основою для оцінки енергетичної безпеки. Запропонована модель розширює можливості традиційних інструментів моделювання енергетичної системи, додаючи здатність моделювати енергетичну систему в умовах стохастичних зривів та пропонує показник енергетичної безпеки, основною метою якого є кількісна оцінка енергетичної безпеки для майбутніх сценаріїв розвитку або шляхів розвитку енергетичної системи з точки зору її стійкості. По суті в роботі пропонується методологія в основі якої полягає аналіз нових загроз, зривів та пов'язаних з ними наслідків для енергетичних систем у поєднанні з інструментом моделювання енергетичної системи OSeMOSYS.

Разом із тим, аналіз наукових джерел показує, що, незважаючи на значний

розвиток багатокритеріальних і ризик-орієнтованих підходів, існує низка невирішених проблем, а саме відсутня єдина методологія інтеграції кваліметричних підходів та ризик-аналізу, недостатньо розроблені підходи до формування інтегральних показників якості функціонування складних технічних систем, зокрема енергоблоків АЕС, обмежено враховується вплив ризиків на узагальнені показники якості, існує проблема обґрунтування вагових коефіцієнтів та забезпечення відтворюваності результатів. Таким чином, існує об'єктивна необхідність у розробленні науково обґрунтованого підходу до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоків АЕС із урахуванням ризик-орієнтованих принципів, що й визначає актуальність даного дослідження.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування науково-методичного підходу до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоку атомної електростанції на основі ризик-орієнтованого підходу, що передбачає формування інтегрального показника якості з урахуванням технічних, експлуатаційних та ризикових факторів для підвищення обґрунтованості управлінських рішень у процесі експлуатації енергетичних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Енергоблок атомної електростанції є складною технічною системою з високим рівнем потенційної небезпеки, функціонування якої визначається сукупністю взаємопов'язаних технічних, організаційних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних та етичних факторів. Особливістю таких систем є їх багаторівнева структура, наявність значної кількості внутрішніх і зовнішніх зв'язків, а також чутливість до впливу невизначеностей і ризиків різної природи. Існуючі підходи до оцінювання функціонування енергоблоків, як правило, базуються на аналізі окремих технічних або економічних показників, що не дозволяє адекватно відобразити складність процесів, які відбуваються в системі. Крім того, такі підходи обмежено враховують нелінійний характер взаємодії факторів, їх синергетичний ефект, а також вплив ризиків, що виникають як у

результаті внутрішніх відхилень у роботі системи, так і під дією зовнішніх чинників. У цьому контексті доцільним є застосування кваліметричного підходу, який передбачає системне оцінювання якості функціонування об'єкта на основі сукупності кількісних і якісних показників. На відміну від класичних методів, кваліметрія дозволяє інтегрувати різноманітні характеристики, враховувати експертні оцінки та формалізувати слабо структуровані параметри, зокрема такі, як організаційна ефективність, культура безпеки або рівень інформаційної забезпеченості.

Водночас специфіка об'єктів атомної енергетики обумовлює необхідність обов'язкового врахування ризиків при оцінюванні їх функціонування. Ризики у даному випадку мають комплексний характер і включають технічні відмови,

людський фактор, організаційні недоліки, інформаційні загрози та зовнішні впливи. Важливою особливістю є те, що зазначені ризики не є незалежними, а перебувають у складній взаємодії, що може призводити до ефектів посилення або, навпаки, часткового взаємного компенсування.

Таким чином, якість функціонування енергоблоку АЕС доцільно розглядати як результат взаємодії двох ключових складових: поточного стану системи, що описується множиною показників, та ризиків, які впливають на стабільність і безпеку її роботи. У загальному вигляді це може бути представлено як функціональна залежність:

$$Q = f(X, R),$$

де X — множина параметрів, що характеризують різні аспекти функціонування енергоблоку,

R — сукупність ризиків, пов'язаних із його експлуатацією.

На відміну від спрощених моделей, у запропонованому підході множина X формується як багатовимірний простір показників, згрупованих за функціональною ознакою, а ризики R розглядаються як похідні від цих показників із урахуванням їх взаємозв'язків. Це дозволяє врахувати не лише прямий вплив окремих факторів, але й їх опосередковану дію через систему внутрішніх залежностей. Ключовою особливістю запропонованої методики є врахування синергетичного ефекту взаємодії показників. Зміна одного параметра може призводити до каскадних змін інших характеристик системи, що особливо характерно для об'єктів підвищеної небезпеки. Тому оцінювання здійснюється не ізольовано для кожного показника, а з урахуванням структури їх взаємозв'язків.

Запропонований підхід дозволяє комплексно враховувати різноманітні фактори, що впливають на функціонування енергоблоку, поєднувати кількісні та якісні показники в єдиній системі оцінювання, враховувати вплив як внутрішніх, так і зовнішніх ризиків, аналізувати взаємозв'язки та синергетичні ефекти між показниками, підвищити обґрунтованість управлінських рішень щодо експлуатації енергоблоків АЕС.

Для реалізації запропонованого підходу необхідним є формування багаторівневої системи показників, яка дозволяє комплексно відобразити особливості функціонування енергоблоку АЕС з урахуванням його технічної складності, потенційної небезпечності та впливу широкого спектра внутрішніх і зовнішніх факторів.

Сформована система показників має адаптивний характер і може змінюватися залежно від умов функціонування об'єкта. Зокрема, вона враховує:

- внутрішні фактори (модернізація обладнання, зміна режимів експлуатації, перепризначення термінів ремонту, кадрові зміни, впровадження нових технологій тощо);
- зовнішні фактори (зміни нормативно-правового середовища, ринкові умови, геополітичні ризики, екологічні вимоги, кіберзагрози тощо).

Такий підхід забезпечує гнучкість системи оцінювання та її здатність до актуалізації відповідно до реальних умов експлуатації енергоблоку. З урахуванням багатопараметричності об'єкта дослідження показники згруповано за такими основними категоріями: технічні, економічні, соціальні, організаційні, етичні, інформаційні та екологічні (табл. 1).

Таблиця 1
Система показників кваліметричного оцінювання
Table 1

System of indicators for qualimetric assessment

Показник оцінювання	Вплив (внутрішній/зовнішній)	Тип оцінювання (кількісна/ якісна)
Технічні		
Коефіцієнт готовності обладнання	внутрішній	кількісна
Частота відмов		кількісна
Коефіцієнт використання встановленої потужності	внутрішній	кількісна
Рівень фізичного зносу обладнання	внутрішній	кількісна
Тривалість простоїв	внутрішній	кількісна
Показники ядерної та радіаційної безпеки	внутрішній	кількісна
Надійність систем охолодження	внутрішній	кількісна
Стан систем захисту	внутрішній	кількісна
Економічні		
Собівартість виробництва електроенергії	внутрішній/зовнішній	кількісна
Витрати на технічне обслуговування	внутрішній	кількісна
Втрати від простоїв	внутрішній	кількісна
Інвестиції у модернізацію	внутрішній	кількісна
Рівень фінансової стійкості	зовнішній	кількісна
Економічна ефективність експлуатації	внутрішній	кількісна
Рівень штрафних санкцій	зовнішній	кількісна
Соціальні		
Рівень кваліфікації персоналу	внутрішній	кількісна/ якісна
Плинність кадрів	внутрішній	кількісна
Рівень виробничого травматизму	внутрішній	кількісна
Культура безпеки	внутрішній	якісна
Рівень стресу персоналу	внутрішній	якісна
Соціальна стабільність колективу	внутрішній	якісна
Рівень підготовки до аварійних ситуацій	внутрішній	якісна
Організаційні		
Ефективність управління	внутрішній	якісна
Якість планування ремонтів	внутрішній	кількісна
Рівень регламентованості процесів	внутрішній	якісна
Швидкість прийняття рішень	внутрішній	кількісна
Рівень внутрішнього контролю	внутрішній	якісна
Відповідність стандартам	зовнішній	якісна
Гнучкість організаційної структури	внутрішній	якісна
Етичні		
Дотримання норм безпеки	внутрішній	якісна
Прозорість діяльності	зовнішній	якісна
Відповідальність керівництва	внутрішній	якісна
Дотримання міжнародних вимог	зовнішній	якісна
Етичність прийняття рішень	внутрішній	якісна
Відкритість до аудиту	зовнішній	якісна
Інформаційні		
Якість даних моніторингу	внутрішній	кількісна
Швидкість обробки інформації	внутрішній	кількісна
Рівень цифровізації	внутрішній	кількісна
Рівень кібербезпеки	зовнішній/внутрішній	кількісна/ якісна
Надійність ІТ-систем	внутрішній	кількісна
Доступність інформації	внутрішній	якісна
Інтегрованість інформаційних систем	внутрішній	якісна

Екологічні		
Рівень викидів	зовнішній	кількісна
Обсяг радіоактивних відходів	внутрішній	кількісна
Ефективність поводження з відходами	внутрішній	кількісна/ якісна
Вплив на довкілля	зовнішній	якісна
Використання ресурсів	внутрішній	кількісна
Відповідність екологічним нормам	зовнішній	якісна
Рівень екологічного моніторингу	внутрішній	кількісна

Побудована система показників не є жорстко фіксованою і може бути розширена або модифікована залежно від цілей дослідження, доступності даних та специфіки конкретного енергоблоку чи енергетичного об'єкта. Зокрема, до неї можуть бути додані показники, що характеризують, наприклад, інноваційний розвиток, рівень автоматизації або стійкість до екстремальних впливів. Водночас у процесі формування системи показників доцільно уникати дублювання або надлишковості, тобто при аналізі частина показників може бути виключена або агрегована у разі, якщо вони є складовими інших або мають високий рівень кореляції. Наприклад, показник «загальна ефективність експлуатації» може включати складові, такі як коефіцієнт використання потужності та витрати на обслуговування, а «рівень цифровізації» частково відображає характеристики інформаційної інтеграції та швидкості обробки даних. Такий загальний якісний показник, як «культура безпеки» може узагальнювати показники дотримання норм, рівня підготовки персоналу та організаційної дисципліни, що також можна відкинути для усунення зайвого дублювання. Таким чином, запропонована система показників є гнучкою, масштабованою та здатною до адаптації, що дозволяє забезпечити адекватне відображення складної структури факторів, які визначають якість функціонування енергоблоку АЕС, а також створює основу для подальшого аналізу їх взаємозв'язків і впливу на ризики.

Наступним етапом після ідентифікації системи показників та їх аналізу з метою повного врахування можливих аспектів функціонування енергоблоку, а також виключення дублюючих або надлишкових характеристик, є визначення вагомості кожного показника в загальній системі оцінювання. Враховуючи багатопараметричний характер досліджуваного

об'єкта, різномірність показників (кількісних і якісних), а також складність формалізації окремих із них, доцільним є застосування експертного методу визначення вагових коефіцієнтів. Особливістю запропонованого підходу є формування окремих експертних груп за кожним напрямом оцінювання, що відповідає структурі системи показників (табл. 1). Така організація забезпечує більш глибоке та обґрунтоване оцінювання, оскільки кожна група експертів працює в межах власної професійної компетенції, враховуючи специфіку технічних, економічних, соціальних, організаційних, етичних, інформаційних та екологічних аспектів. У межах кожної групи здійснюється оцінювання вагомості всіх відповідних показників із урахуванням їх впливу на якість функціонування та рівень ризику. Такий підхід дозволяє врахувати досвід, знання та професійні судження фахівців у галузі експлуатації, безпеки та управління енергоблоками АЕС. При формуванні експертної групи доцільно включати фахівців різних напрямів: технічного обслуговування та експлуатації; ядерної та радіаційної безпеки; економіки енергетики; управління персоналом; інформаційних технологій та кібербезпеки. Це забезпечує міждисциплінарний характер оцінювання та дозволяє більш повно врахувати специфіку кожної групи показників.

Кожному експерту пропонується оцінити вагомість кожного показника i у межах інтервалу $[0;1]$, з урахуванням його впливу на якість функціонування та рівень ризику. Агрегування індивідуальних експертних оцінок здійснюється із застосуванням робастних статистичних характеристик. Для кожного показника i формується сукупність оцінок w_{ij} , отриманих від експертів відповідної групи, де $j = 1, 2, \dots, m$, а m - кількість експертів. З метою зменшення впливу крайніх

(аномальних) оцінок та підвищення стійкості результатів до суб'єктивних відхилень, агрегування експертних оцінок здійснюється за допомогою медіанного значення:

$$w_i^{med} = median(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}), \quad (1)$$

де w_{ij} - оцінка вагомості i -го показника, надана j -м експертом, m - кількість експертів у відповідній групі: економічні, технічні, екологічні, тощо (табл. 1).

Для кожного показника якості, що визначають функціонування енергоблоку,

визначають середнє значення $\bar{w}_{iav} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i$, де m - кількість експертів (кількість експертних оцінок), та складають кодовану матрицю, яка візуально представлена у вигляді таблиці 2. Показники кодують знаком "+", якщо результат вимірювання показника якості вищий за середній, та знаком "-", якщо результат вимірювання показника якості нижчий за середній. Згідно з даними кодованої матриці будують діаграму розсіювання (рис.1). На діаграмі розсіювання на осі абсцис зазначають номер показника якості, а на осі ординат - відповідне кодоване значення експертних оцінок.

Таблиця 2

Візуальне представлення кодованої матриці показників оцінювання якості та результатів розрахунку коефіцієнтів вагомості

Table 2

Visual representation of the coded matrix of quality assessment indicators and the results of calculating weighting coefficients

Експерт	Показник оцінювання якості					Показник	Позначення	Показник оцінювання якості				
	1	2	3	4	i			1	2	3	4	i
1	...	...	...	...	...	Медіана "+"	$M_i^{ "+" }$					
2	...	...	...	...	...	Медіана "-"	$M_i^{ "-" }$					
3	...	...	...	...	...	Різниця медіан	Δ_i					
...	...	...	...	...	...	Коефіцієнт вагомості	w_i					
m						Значущий коефіцієнт вагомості	w_i					

Для показників якості визначають медіани M_i^+, M_i^- : $M_i^{+/-} = \sum_{i=1}^m R_i$, де m - кількість показників більше «+» / менше «-» середнього відповідно для обрахування M_i^+, M_i^- : Далі знаходять різницю медіан за формулою: $\Delta_i = |M_i^+ - M_i^-|$. Визначають коефіцієнти вагомості w_i для кожного з показників оцінювання якості:

$$w_i = \frac{\Delta_i}{\sum_{i=1}^m \Delta_i}. \quad (2)$$

При цьому, показники оцінювання якості, для яких є правильною нерівність $w_i > \frac{1}{m}$, вважаються визначальними. Уточнення коефіцієнтів вагомості здійснюють згідно з формулою:

$$w_i' = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{m_0} w_i}, \quad (3)$$

де m_0 - кількість визначальних показників якості.

Застосування медіани є об'єктивним у випадках, коли: можливі значні розбіжності в оцінках експертів, присутні суб'єктивні або нечіткі критерії, необхідно забезпечити робастність результатів.

З метою більш повного відображення розподілу експертних суджень додатково визначається мода як значення, що найчастіше зустрічається в сукупності оцінок:

$$w_i^{mod} = mode(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}). \quad (4)$$

Поєднання медіани та моди дозволяє не лише отримати стійку оцінку центральної тенденції, але й врахувати найбільш типовий рівень значущості показника, що є особливо важливим у випадку наявності кластеризації експертних думок, та забезпечує більш глибоке розуміння структури оцінок і підвищує інформативність результатів. При цьому значення моди може використовуватися як додатковий індикатор для аналізу стабільності оцінок і виявлення можливих розбіжностей між експертами. З метою оцінювання узгодженості експертних суджень доцільно застосовувати статистичні показники, зокрема коефіцієнт конкордації, який дозволяє визначити ступінь погодженості ранжування показників. У разі виявлення низького рівня узгодженості може бути проведено повторне експертне оцінювання або уточнення формулювання

показників. Практична реалізація обчислень, пов'язаних із визначенням медіани, моди, нормуванням вагових коефіцієнтів та оцінюванням узгодженості експертних оцінок, може бути здійснена із використанням спеціалізованих програмних засобів статистичного аналізу, зокрема пакету Statistica [23], що забезпечує автоматизацію розрахунків, підвищення точності результатів та можливість їх подальшої візуалізації.

Запропонований підхід до визначення вагових коефіцієнтів дозволяє врахувати міждисциплінарний характер системи показників, зменшити вплив суб'єктивних факторів та забезпечити адаптивність моделі до змін умов функціонування енергоблоку. Це створює необхідне підґрунтя для подальшого аналізу взаємозв'язків між показниками та оцінювання ризиків на основі сформованої системи ваг.

Моделювання взаємозв'язків між показниками на основі графового підходу

З урахуванням того, що функціонування енергоблоку АЕС визначається не лише сукупністю окремих показників, а й характером їх взаємодії, важливим етапом дослідження є моделювання взаємозв'язків між ними. У реальних умовах експлуатації вплив окремих факторів не є ізольованим: зміна одного показника може спричинити каскадні ефекти, що проявляються через інші параметри системи, формуючи складну мережу залежностей. Для формалізації таких взаємозв'язків доцільно застосувати графовий підхід, який дозволяє відобразити структуру впливів між показниками та врахувати їх синергетичний характер.

Система показників представляється у вигляді орієнтованого графа:

$$G = (V, E), \quad (5)$$

де V - множина вершин, що відповідають показникам, E - множина орієнтованих ребер, які відображають вплив одного показника на інший.

Наявність ребра між вершинами i та j означає, що показник x_i впливає на показник x_j , причому цей вплив може бути як прямим, так і опосередкованим через інші елементи системи. Сила впливу визначається ваговим коефіцієнтом зв'язку.

Графова модель формалізується у вигляді матриці суміжності:

$$A = [a_{ij}], \quad (6)$$

де $a_{ij} \in [0; 1]$ - коефіцієнт впливу показника i на показник j .

Значення $a_{ij} = 0$ означає відсутність впливу, тоді як значення, близькі до 1, характеризують сильний вплив. Формування матриці A може здійснюватися на основі експертних оцінок або аналізу статистичних даних. Особливістю такої моделі є можливість врахування не лише прямих, але й непрямих (ланцюгових) впливів, що є принципово важливим для складних технічних систем, таких як енергоблоки АЕС. Разом з тим, у системах типу енергоблоку АЕС часто спостерігаються синергетичні ефекти, коли сукупний вплив декількох факторів перевищує просту суму їх індивідуальних впливів. Наприклад, одночасне зниження кваліфікації персоналу та погіршення стану обладнання може призвести до значно вищого рівня ризику, ніж кожен фактор окремо.

Для врахування таких ефектів використовується узагальнене представлення впливів:

$$X^{corr} = (I - A)^{-1}X, \quad (7)$$

де X - вектор вихідних значень показників, I - одинична матриця, A - матриця взаємозв'язків.

Отриманий вектор X^{corr} відображає скориговані значення показників з урахуванням як прямих, так і непрямих впливів між ними.

Запропонований підхід дозволяє виявити ключові показники, які мають найбільший вплив на інші, визначити вузлові елементи системи, що формують основні ризики, оцінити ступінь взаємозалежності між різними групами факторів та врахувати ефекти поширення впливів у системі. Зокрема, показники з високими значеннями сумарного вихідного впливу можуть розглядатися як критичні точки управління, оскільки їх зміна здатна суттєво впливати на загальний стан системи. При цьому практична реалізація графової моделі передбачає формування матриці взаємозв'язків на основі експертних оцінок, можливість використання шкали (наприклад:

слабкий, середній, сильний вплив) з подальшою кількісною інтерпретацією та дає можливість періодичного оновлення структури графа у разі зміни умов функціонування. Важливою перевагою такого підходу є його гнучкість і адаптивність: структура взаємозв'язків може змінюватися залежно від режиму роботи енергоблоку, рівня навантаження, технічного стану та зовнішніх умов. Таким чином, використання графового підходу дозволяє перейти від ізольованого аналізу показників до системного розгляду їх взаємодії, що є принципово важливим для об'єктів підвищеної небезпеки, до яких належать енергоблоки АЕС. Отримані результати створюють основу для подальшого оцінювання ризиків з урахуванням складної структури взаємозв'язків між факторами.

Оцінювання ризиків функціонування енергоблоку АЕС з урахуванням системи показників та їх взаємозв'язків

Оцінювання ризиків функціонування енергоблоку АЕС у межах запропонованого підходу базується на інтеграції трьох взаємопов'язаних складових: системи показників, їх вагових коефіцієнтів та структури взаємозв'язків між ними. Такий підхід дозволяє перейти від спрощеного аналізу окремих факторів до комплексного урахування багатопараметричності системи, її внутрішньої динаміки та потенційних синергетичних ефектів. Як правило, ризик розглядається як функція окремих не залежних змінних, а у даному випадку формується як результат взаємодії показників, що можуть підсилювати або послаблювати вплив один одного, що особливо важливо для об'єктів підвищеної небезпеки, де навіть незначні відхилення у декількох підсистемах можуть призводити до суттєвого зростання загального рівня ризику.

Формально ризик функціонування енергоблоку пропонується визначати як функцію від скоригованих значень показників з урахуванням їх взаємозв'язків:

$$R = f(\tilde{X}), \quad (8)$$

де $\tilde{X} = X^{corr}$ - вектор показників, скоригований на основі графової моделі взаємодій.

З урахуванням вагових коефіцієнтів, отриманих на попередньому етапі, оцінка

ризиків може бути представлена у вигляді зваженої суми:

$$R = \sum_{i=1}^n \tilde{w}_i \cdot r_i, \quad (9)$$

де $\tilde{w}_i$ - нормований ваговий коефіцієнт -го показника, r_i - частковий ризик, пов'язаний із відповідним показником.

Частковий ризик r_i визначається на основі відхилення фактичного значення показника від його нормативного або цільового рівня:

$$r_i = \frac{|x_i - x_i^{ref}|}{x_i^{ref}}, \quad (10)$$

де x_i - фактичне значення показника, x_i^{ref} - еталонне (нормативне) значення.

При цьому часткові ризики формуються не лише на основі окремих показників, але й з урахуванням їх взаємного впливу. Скориговані значення $\tilde{X}$, отримані за допомогою графової моделі, дозволяють врахувати ефекти поширення відхилень у системі. Таким чином, навіть якщо окремий показник має незначне відхилення, його вплив на інші елементи системи може призводити до суттєвого зростання загального ризику.

Для якісних показників використовується шкала вербальних оцінок (наприклад, «низький», «середній», «високий ризик») з подальшою їх кількісною інтерпретацією. А отримане значення ризику може бути інтерпретоване за рівнями, що характеризують стан функціонування енергоблоку, наприклад: допустимий рівень; підвищений рівень; критичний рівень. Межі цих рівнів можуть встановлюватися на основі нормативних вимог, статистичних даних або експертних оцінок. Важливою перевагою такого підходу є можливість деталізації результатів, тобто визначення внеску окремих груп показників у загальний ризик, ідентифікувати найбільш критичні фактори, визначити пріоритетні

напрями управління, та обґрунтувати заходи щодо зниження ризиків, що стануть частиною стратегії управління енергоблоком та АЕС в цілому. Зміна значень показників, їх ваг або структури взаємозв'язків призводить до автоматичного оновлення оцінки ризику, що забезпечує актуальність результатів у динамічних умовах експлуатації

Таким чином, запропонований підхід до оцінювання ризиків дозволяє врахувати складну природу функціонування енергоблоку АЕС, забезпечує інтеграцію кількісних і якісних характеристик, а також дозволяє відобразити синергетичний вплив факторів, що формують загальний рівень безпеки та надійності системи.

Результати досліджень

Для демонстрації практичного застосування запропонованої методики розглянемо приклад оцінювання ризику функціонування енергоблоку АЕС на основі обмеженої множини показників із різних

груп. Так, для аналізу було обрано 5 показників оцінювання якості (табл. 3) та розраховано часткові показники за формулою (10).

Таблиця 3
Показники оцінювання якості
Table 3
Quality assessment indicators

№	Показник	Група	x_i	x_i^{ref}	$\widetilde{w}_i$	r_i
1	Коефіцієнт готовності	технічна	0,92	0,98	0,25	0,92 - 0,98
2	Частота відмов	технічна	0,08	0,03	0,20	0,08 - 0,03
3	Собівартість енергії	економічна	1,15	1,00	0,15	1,15 - 1,00
4	Культура безпеки	соціальна	0,70	0,90	0,20	0,70 - 0,90
5	Рівень кібербезпеки	інформаційна	0,75	0,95	0,20	0,75 - 0,95

Нехай матриця взаємозв'язків має вигляд (фрагмент):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0,2 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0,1 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,1 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0,1 & 0 \\ 0,2 & 0,2 & 0,1 & 0 & 0,2 \\ 0 & 0,1 & 0 & 0,2 & 0 \end{bmatrix}$$

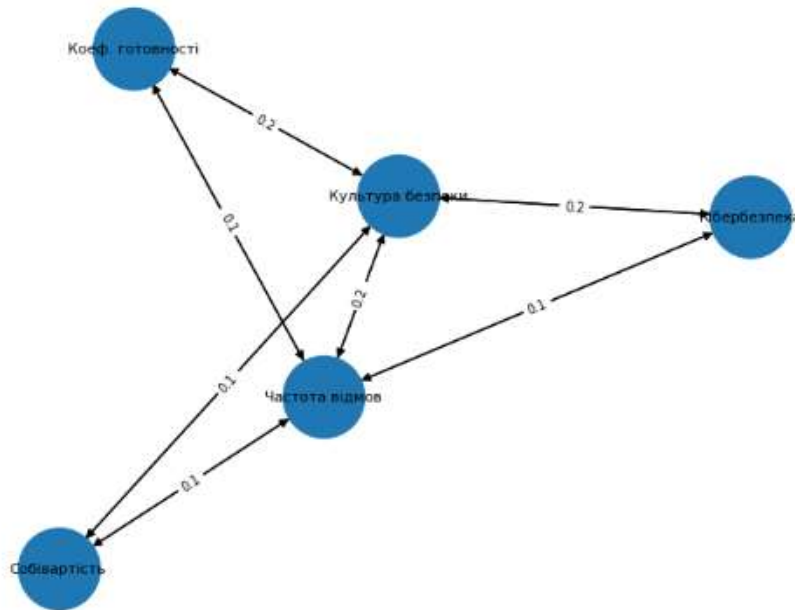


Рис. 1 – Візуальне представлення графу і зв'язків між показниками оцінювання якості функціонування енергоблоку

Fig. 1 – Visual representation of the graph and relationships between indicators for assessing the quality of operation of a power unit

Побудований граф відображає структуру взаємозв'язків між обраними показниками та дозволяє візуалізувати характер і інтенсивність їх взаємного впливу в межах оцінювання ризику функціонування енергоблоку. Кожна вершина графа відповідає окремому показнику, що характеризує певний аспект функціонування системи, тоді як орієнтовані ребра між вершинами відображають напрям впливу одного показника на інший. Таким чином, стрілка від одного вузла до іншого означає, що зміна першого показника призводить до зміни другого, формуючи причинно-наслідковий зв'язок у системі. Кількісна інтерпретація сили такого впливу задається ваговими коефіцієнтами, які підписані на відповідних ребрах графа. Чим більше значення коефіцієнта, тим суттєвішим є вплив одного показника на інший, що дозволяє не лише фіксувати сам факт взаємозалежності, але й оцінювати її інтенсивність. У результаті формується зважена мережа взаємодій, у якій окремі зв'язки можуть відігравати визначальну роль у формуванні загального рівня ризику. Аналіз структури графа свідчить про нерівномірність розподілу впливів між показниками. Деякі з них виконують переважно роль “джерел” впливу, інші – “приймачів”, тоді як окремі вузли поєднують обидві функції, виступаючи ключовими елементами системи. Зокрема, показник, що характеризує частоту відмов,

займає центральне положення в структурі графа, оскільки має значну кількість як вихідних, так і вхідних зв'язків. Це означає, що він не лише безпосередньо впливає на інші параметри системи, але й сам є чутливим до змін у них. Така позиція вказує на його критичну роль у формуванні загального рівня ризику.

Важливою особливістю графа є наявність замкнених контурів впливу, які відображають потенційні циклічні залежності між показниками. У таких випадках зміна одного параметра може опосередковано повертатися до нього через ланцюг інших впливів, підсилюючи або послаблюючи початковий ефект. Це створює передумови для виникнення синергетичних ефектів, коли сукупний вплив декількох факторів перевищує їх індивідуальний внесок. Таким чином, графова модель дозволяє перейти від лінійного уявлення про систему до мережевої інтерпретації її функціонування, у якій ризик формується як результат складної взаємодії показників. Візуалізація таких зв'язків не лише підвищує наочність аналізу, але й створює основу для ідентифікації критичних вузлів системи, вплив на які може забезпечити найбільш ефективне зниження загального рівня ризику.

Після врахування взаємозв'язків (наближено) за формулою $r_i^{corr} \approx r_i + a_{ij}r_j$ отримуємо наступні значення:

№	Показник	r_i^{corr}
1	Коефіцієнт готовності	$0,061 + (0,2 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,222) \approx 0,428$
2	Частота відмов	$1,667 + (0,1 \cdot 0,061 + 0,2 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 0,222 + 0,1 \cdot 0,211) \approx 1,806$
3	Собівартість енергії	$0,15 + (0,1 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,222) \approx 0,339$
4	Культура безпеки	$0,222 + (0,2 \cdot 0,061 + 0,2 \cdot 1,667 + 0,1 \cdot 0,15 + 0,2 \cdot 0,211) \approx 0,655$
5	Рівень кібербезпеки	$0,211 + (0,1 \cdot 1,667 + 0,2 \cdot 0,222) \approx 0,455$

Наступним етапом розраховуємо інтегральний ризик: $R = \sum \tilde{w}_i \cdot r_i^{corr}$

$$R = 0,25 \cdot 0,428 + 0,20 \cdot 1,806 + 0,15 \cdot 0,339 + 0,20 \cdot 0,655 + 0,20 \cdot 0,455$$

$$R \approx 0,107 + 0,361 + 0,051 + 0,131 + 0,091 = 0,741$$

Отримане значення: $R = 0,741$ свідчить про підвищений рівень ризику, близький до критичного.

Аналіз внеску показує, що найбільший вплив має: частота відмов (через високе відхилення), а також її сильний вплив на інші показники (синергетичний ефект).

Наведений приклад демонструє, що навіть при відносно помірних відхиленнях більшості показників загальний рівень ризику може суттєво зростати внаслідок їх взаємодії. Це підтверджує доцільність використання графової моделі та врахування синергетичних ефектів при оцінюванні функціонування енергоблоку АЕС.

Висновки

У роботі розроблено методичний підхід до кваліметричного оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС на основі ризик-орієнтованої концепції, який враховує складність, багатопараметричність та потенційну небезпечність об'єкта дослідження. Запропонована методика базується на поєднанні кількісних і якісних показників, що формують цілісне уявлення про стан системи з урахуванням впливу як внутрішніх, так і зовнішніх факторів. Для реалізації зазначеного підходу було сформовано адаптивну систему показників, структуровану за основними групами факторів, яка може бути модифікована залежно від умов функціонування енергоблоку, змін у нормативному середовищі, технічному стані обладнання або рівні зовнішніх загроз. Такий підхід дозволяє забезпечити гнучкість моделі та її придатність до використання в динамічних умовах експлуатації.

Запропоновано процедуру визначення вагових коефіцієнтів на основі експертного оцінювання з використанням медіани як стійкої статистичної характеристики та моди як індикатора найбільш типових значень, що підвищує обґрунтованість результатів та дозволяє врахувати особливості розподілу експертних суджень. Організація експертного оцінювання за

групами факторів сприяє більш глибокому врахуванню специфіки кожного напрямку оцінювання.

Наступним етапом оцінювання якості функціонування енергоблоку АЕС було моделювання взаємозв'язків між показниками на основі графового представлення, що дозволяє врахувати не лише прямі, але й непрямі впливи, а також синергетичні ефекти, які виникають у складних технічних системах. Це забезпечує перехід від ізольованого аналізу показників до системного розгляду процесів функціонування енергоблоку.

Таким чином, у межах запропонованої методики розроблено підхід до оцінювання ризиків, який інтегрує скориговані значення показників, їх вагомості та структуру взаємозв'язків, що дозволяє більш адекватно відобразити реальний рівень безпеки. Наведений приклад розрахунку підтверджує, що врахування взаємодії факторів суттєво впливає на результати оцінювання та дозволяє виявити критичні елементи системи. Отримані результати мають практичне значення для підвищення ефективності управління безпекою та надійністю функціонування енергоблоків АЕС, оскільки дозволяють ідентифікувати пріоритетні напрями впливу,

обґрунтовувати управлінські рішення та здійснювати моніторинг стану системи в умовах невизначеності. Запропонований підхід може бути використаний як основа для подальших досліджень, спрямованих на

вдосконалення методів оцінювання ризиків, зокрема шляхом розширення системи показників, поглиблення аналізу взаємозв'язків та застосування методів сценарного моделювання.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один з авторів статті є заступником головного редактора цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Автори використовували ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) виключно для редагування мови та корекції граматики. Весь науковий контент, матеріали та висновки були створені авторами. Остаточний текст був переглянутий та перевірений авторами.

Список використаних джерел:

1. Оцінка ризику техногенних аварій насосів АЕС та їхніх екологічних наслідків / О. С. Шевченко, Л. Л. Гурець, М. М. Ковальчук, С. С. Шевченко. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2025. № 2(106). С. 57–65. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).06)
2. Shevchenko S. S. Mathematical modeling of centrifugal machines rotors seals for the purpose of assessing their influence on dynamic characteristics. *Mathematical Modeling and Computing*. 2021. Vol. 8, No. 3. P. 422–431. DOI: <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.422>
3. Удосконалення методу відновлення синтетичної вогнестійкої турбінної оливи для обладнання АЕС / С. В. Зайцев, П. М. Кузнецов, В. П. Кравченко, М. П. Мазник, А. М. Маргаза, В. П. Кишневський. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2025. № 1(105). С. 55–61. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).06)
4. Стан та перспективи випробувань системи герметичного огороження реакторної установки з ВВЕР-1000 на герметичність / В. П. Кравченко, А. П. Власов, А. М. Головченко, А. С. Мазуренко, В. О. Дубковський, О. О. Чулкін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2023. № 2(98). С. 53–60. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05)
5. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems / Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Y., Piontkovskiy O.. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42–45. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).07)
6. Kamali Saraji M., Streimikiene D. A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach. *Sustainable Environment Research*. 2024. Vol. 34. Art. 6. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00211-3>
7. Assessing key indicators of efficient green energy production for IEA members / Kasradze M., Kamali Saraji M., Streimikiene D. et al.. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 55513–55528. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26285-x>
8. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. 2nd ed. Geneva: ISO, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/31000>
9. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. Geneva: ISO, 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/62085.html>
10. Ioannou A., Angus A., Brennan F. Risk-based methods for sustainable energy system planning: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 602–615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.082>
11. Arnold U., Yildiz Ö. Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures – a Monte Carlo simulation approach. *Renewable Energy*. 2015. Vol. 77. P. 227–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.059>
12. Rocchetta R., Li Y. F., Zio E. Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2015. Vol. 136. P. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.013>

13. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств / Г. С. Грінченко, О. В. Кіпоренко, С. С. Негодов, А. Я. Лисенко, К. К. Мазорчук, Р. С. Нос. *Машинобудування*. 2024. № 34. С. 17–30. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02>
14. Лисенко А. Я., Нос Р. С., Мазорчук К. І., Негодов С. С. Удосконалення кваліметричних підходів до оцінювання ризиків енергопідприємств з урахуванням аспектів кібербезпеки. *Машинобудування*. 2025. № 36. С. 102–118. DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10>
15. Peček B., Kovačič A. Methodology of monitoring key risk indicators. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*. 2019. Vol. 32, No. 1. P. 3485–3501. DOI: <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529>
16. Prospective assessment of energy technologies: a comprehensive approach for sustainability assessment / Haase M., Wulf C., Baumann M. et al. *Energy, Sustainability and Society*. 2022. Vol. 12. Art. 20. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
17. Environmental assessment of emerging technologies: recommendations for prospective LCA / Arvidsson R., Tillman A.-M., Sandén B. A. et al. *Journal of Industrial Ecology*. 2018. Vol. 22. P. 1286–1294. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
18. MCDA for the sustainability assessment of energy technologies and systems: identifying challenges and opportunities / Wulf C., Mesa Estrada L. S., Haase M. et al. *Energy, Sustainability and Society*. 2025. Vol. 15. Art. 45. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00546-8>
19. Proper and improper uses of MCDA methods in energy systems analysis / Cinelli M., Burgherr P., Kadziński M., Słowiński R. *Decision Support Systems*. 2022. Vol. 163. Art. 113848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113848>
20. Lindfors A. Assessing sustainability with multi-criteria methods: a methodologically focused literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*. 2021. Vol. 12. Art. 100149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100149>
21. A risk assessment method of the energy supply chain based on combination weights and technique for order preference by similarity to an ideal solution / Liang H., Jiang X., Yang Y. et al. *Energy Reports*. 2023. Vol. 9 (Suppl. 7). P. 1647–1656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.227>
22. Martišauskas L., Augutis J., Krikštolaitis R. Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions. *Energy Strategy Reviews*. 2018. Vol. 22. P. 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
23. Парфенцева Н. О., Голубова Г. В. Статистичні методи контролю якості як інструмент дослідження даних у пакеті Statistica. *Статистика України*. 2023. № 1. С. 19–26. DOI: [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)

Отримано: 08.04.2026 / Переглянуто: 11.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹ **HRINCHENKO H. S.**, Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail: h.s.hrinenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>

¹ **LYSENKO A. YA.**,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail: dagost@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3916-8029>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

QUALIMETRIC ASSESSMENT OF THE PERFORMANCE QUALITY OF A NUCLEAR POWER PLANT UNIT BASED ON A RISK-ORIENTED APPROACH

The article is devoted to the relevant scientific and practical problem of developing and substantiating a methodological approach to the comprehensive assessment of the performance quality of nuclear power plant (NPP) units. In the context of increasing nuclear safety requirements and the need to extend the service life of power equipment, traditional methods based on isolated technical and economic indicators prove insufficient for an adequate representation of the state of complex technical systems. The authors propose an integration of qualimetric analysis methods with the principles of a risk-oriented approach, which allows not only for recording the current parameters of the system but also for considering potential threats and the synergistic effects of their interaction. The study provides a critical analysis of scientific approaches to ensuring NPP operational safety in Ukraine and global experience in applying multi-criteria decision analysis (MCDA) in the energy sector. It was identified that the key issue is the lack of a unified methodology that combines quantitative technical parameters with qualitative characteristics, such as safety culture or organizational efficiency. Based on a systems approach, a multi-level system of 49 indicators has been formed, structured into seven categories: technical, economic, social, organizational, ethical, informational, and environmental. A distinctive feature of the system is its adaptability to internal (modernization, personnel) and external (cyber threats, regulatory changes) factors. The methodological part of the research describes the process of determining the weights of indicators using expert groups and statistical methods. To increase the objectivity of the assessments, the use of median values and mode is proposed, which allows for neutralizing the influence of anomalous expert opinions. A significant scientific result is the application of a graph-based approach for modeling the interrelationships between indicators. The constructed directed graph model and adjacency matrix allow for the identification of "node" parameters, the change of which causes a cascading impact on the safety of the entire power unit. The interpretation of the modeling results indicates that the performance quality of an NPP is a functional dependence on the current state and the aggregate of associated risks. The proposed approach provides a scientific basis for making informed management decisions regarding equipment modernization and operational resource management, taking into account the non-linear nature of factor interaction in high-hazard systems.

Keywords: nuclear power plant, power unit, qualimetric assessment, risk-oriented approach, integral quality indicator, operational safety, graph model.

In cites: Hrinchenko H. S., Lysenko A. Ya. (2026). Qualimetric assessment of the performance quality of a nuclear power plant unit based on a risk-oriented approach. *Engineering*, (37), 6-23. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-01> (in Ukraine)

Conflict of interest

Authors certify that, although one of the authors of the article serves as a deputy editor-in-chief of this journal, the peer review process, the decision regarding publication, and the editing were conducted independently, without his involvement or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

The authors used ChatGPT-5.1 (OpenAI, 2025) exclusively for language editing and grammar correction. All scientific content, materials, and conclusions were created by the authors. The final text was reviewed and checked by the authors.

References:

1. Shevchenko, OS, Hurets, LL, Kovalchuk, MM & Shevchenko, SS 2025, 'Otsinka ryzyku tekhnohennykh avarii nasosiv AES ta yikhnikh ekolohichnykh naslidkiv' [Risk assessment of man-made accidents at nuclear power plant noses and other environmental consequences], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no 2(106), pp. 57–65. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).06) (in Ukraine)
2. Shevchenko, SS 2021, 'Mathematical modeling of centrifugal machines rotors seals for the purpose of assessing their influence on dynamic characteristics', *Mathematical Modeling and Computing*, no 8(3), pp. 422–431. <https://doi.org/10.23939/mmc2021.03.422>
3. Zaitsev, SV, Kuznietsov, PM, Kravchenko, VP, Maznyk, MP, Marhaza, AM & Kyshnevskiy, VP 2025, 'Udoskonalennia metodu vidnovlennia syntetychnoi vohnestiikoi turbinni olyvy dlia obladnannia AES' [Improvement of the method for recovering synthetic fire-resistant turbine oil for Nuclear power plant equipment.], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no 1(105), pp. 55–61. [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1\(105\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.1(105).06) (in Ukraine)
4. Kravchenko, VP, Vlasov, AP, Holovchenko, AM, Mazurenko, AS, Dubkovskiy, VO & Chulkin, OO 2023, 'Stan ta perspektyvy vyprobuvan systemy hermetychnoho ohorodzhennia reaktornoj ustanovky z VVER-1000 na hermetychnist' [Status and prospects of testing the hermetic protection system of the VVER-1000 reactor plant for tightness.], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 2(98), pp. 53–60. [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2\(98\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.2(98).05) (in Ukraine)
5. Skalozubov, V, Kozlov, I, Chulkin, O, Komarov, Y & Piontkovskiy, O 2019, 'Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems', *Nuclear and Radiation Safety*, iss 1(81), pp. 42–45. [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).07)
6. Kamali Saraji, M & Streimikiene, D 2024, 'A novel multicriteria assessment framework for evaluating the performance of the EU in dealing with challenges of the low-carbon energy transition: an integrated Fermatean fuzzy approach', *Sustainable Environment Research*, iss 34, p. 6. <https://doi.org/10.1186/s42834-024-00211-3>
7. Kasradze, M, Kamali Saraji, M, Streimikiene, D et al. 2023, 'Assessing key indicators of efficient green energy production for IEA members', *Environmental Science and Pollution Research*, iss 30, pp. 55513–55528. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26285-x>
8. International Organization for Standardization 2018, *ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines*. 2nd edn. Geneva, viewed <<https://www.iso.org/standard/31000>>
9. International Organization for Standardization 2015, *ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements*. Geneva, viewed <<https://www.iso.org/standard/62085.html>>
10. Ioannou, A, Angus, A & Brennan, F 2017, 'Risk-based methods for sustainable energy system planning: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, iss 74, pp. 602–615. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.082>
11. Arnold, U & Yildiz, Ö 2015, 'Economic risk analysis of decentralized renewable energy infrastructures – A Monte Carlo simulation approach', *Renewable Energy*, iss 77, pp. 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.059>
12. Rocchetta, R, Li, YF & Zio, E 2015, 'Risk assessment and risk-cost optimization of distributed power generation systems considering extreme weather conditions', *Reliability Engineering & System Safety*, iss 136, pp. 47–61. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.11.013>
13. Hrinchenko, HS, Kiporenko, OV, Nehodov, SS, Lysenko, AY, Mazorchuk, KK & Nos, RS 2024, 'Rozvytok normatyvnoho pidkhodu do otsiniuvannia ryzykiv enerhopidpriemstv' [Development of a regulatory approach to assessing the risks of energy enterprises.], *Engineering*, iss 34, pp. 17–30. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02> (in Ukraine)
14. Lysenko, AY, Nos, RS, Mazorchuk, KI & Nehodov, SS 2025, 'Udoskonalennia kvalimetrychnykh pidkhodiv do otsiniuvannia ryzykiv enerhopidpriemstv z urakhuvanniam aspektiv kiberbezpeky' [Improving qualimetric approaches to assessing the risks of energy enterprises, taking into account cybersecurity aspects.], *Engineering*, iss 36, pp. 102–118. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10> (in Ukraine)
15. Peček, B & Kovačič, A 2019, 'Methodology of monitoring key risk indicators' [Methodology for monitoring key risk indicators], *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, iss 32(1), pp. 3485–3501. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529> (in Ukraine)

16. Haase, M, Wulf, C, Baumann, M et al 2022, 'Prospective assessment of energy technologies: A comprehensive approach for sustainability assessment', *Energy, Sustainability and Society*, no 12, p. 20. <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
17. Arvidsson, R, Tillman, AM, Sandén, BA et al 2018, 'Environmental assessment of emerging technologies: Recommendations for prospective LCA', *Journal of Industrial Ecology*, iss 22, pp. 1286–1294. <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
18. Wulf, C, Mesa Estrada, LS, Haase, M et al 2025, 'MCDA for the sustainability assessment of energy technologies and systems: Identifying challenges and opportunities', *Energy, Sustainability and Society*, iss 15, p. 45. <https://doi.org/10.1186/s13705-025-00546-8>
19. Cinelli, M, Burgherr, P, Kadziński, M & Słowiński, R 2022, 'Proper and improper uses of MCDA methods in energy systems analysis', *Decision Support Systems*, iss 163, 113848. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2022.113848>
20. Lindfors, A 2021, 'Assessing sustainability with multi-criteria methods: A methodologically focused literature review', *Environmental and Sustainability Indicators*, no 12, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100149>
21. Liang, H, Jiang, X, Yang, Y et al 2023, 'A risk assessment method of the energy supply chain based on combination weights and technique for order preference by similarity to an ideal solution', *Energy Reports*, no 9(Suppl. 7), pp. 1647–1656. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.227>
22. Martišauskas, L, Augutis, J & Krikštolaitis, R 2018, 'Methodology for energy security assessment considering energy system resilience to disruptions', *Energy Strategy Reviews*, iss 22, pp. 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.007>
23. Parfentseva, NO & Holubova, HV 2023, 'Statystychni metody kontroliu yakosti yak instrument doslidzhennia danykh u paketi Statistica', *Statystyka Ukrainy*, iss 1, pp. 19–26. [https://doi.org/10.31767/su.1\(100\)2023.01.02](https://doi.org/10.31767/su.1(100)2023.01.02)

Submission received 04.08.2026/Revised: 05.11.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-02>

УДК 681.2:53.088

АРТЮХ С.М., кандидат технічних наук;

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: s.m.artyh@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-6313>

АРТЮХ А.В.,

e-mail nartyh17@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0396-0934>

КНЯЗЄВА В.М., кандидат технічних наук

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail v.m.kniazieva@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-4897>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

У статті розглянуто сучасні методи оцінювання та забезпечення метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем. Актуальність теми зумовлена широким поширенням інформаційно-вимірювальних систем у багатьох галузях промисловості та виробництва, при цьому особливої уваги набувають завдання забезпечення високого рівня їх метрологічної надійності.

Метою даного дослідження є реалізація методів оцінки та підвищення метрологічного ресурсу, як основного показника метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем на етапах їх проектування та експлуатації. Рішення поставленого завдання оцінки метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем здійснюється із застосуванням аналітико - імовірнісного методу прогнозування, що включає математичне моделювання процесу зміни в часі метрологічних характеристик інформаційно - вимірювальних систем, а також статистичне моделювання з урахуванням впливу зовнішніх руйнівних факторів навколишнього середовища. Завдання підвищення метрологічної надійності інформаційно - вимірювальних систем вирішується шляхом введення в їх структуру підсистеми метрологічного контролю.

У роботі докладно описані всі етапи математичного моделювання при реалізації методу оцінки метрологічної надійності інформаційно - вимірювальних систем, а також запропоновано їх оптимальну структуру, що включає підсистему метрологічного контролю з функцією автокорекції результатів вимірювань. Запропоновано та докладно описано елементну базу, на якій оптимально реалізується підсистема метрологічного контролю та корекції результатів вимірювань.

Результати дослідження доцільно використовувати при створенні, удосконаленні та експлуатації інформаційно-вимірювальних систем для забезпечення їхньої точності, надійності та ефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аналоговий блок, інформаційно-вимірювальна система, метрологічна надійність, метрологічна характеристика, метрологічний ресурс.

Як цитувати: Артюх С. М., Артюх А. В., Князева В. М. Методи оцінки та забезпечення метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем. Машнобудування. 2026. Вип. 37. С. 24-31. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-02>



Вступ

Серед різноманітних груп вимірювальних засобів широке поширення в даний час отримали інформаційно-вимірювальні системи (ІВС). Можливість реалізації в ІВС складних алгоритмів вимірювання та обробки отриманої інформації, а також різноманітність виконуваних ними функцій дозволяють використовувати зазначені системи у всіх галузях промисловості та виробництва. Однак з ускладненням ІВС все більшої актуальності набуває завдання забезпечення високого рівня їх метрологічної надійності (МН), що характеризує здатність ІВС зберігати в часі метрологічні характеристики (МХ) у межах встановлених норм [1–3].

Метрологічна надійність є показником якості ІВС. Для кількісної оцінки метрологічної надійності основним показником є метрологічний ресурс (МР), що оцінюється часом перетину реалізації неста-

ціонарного випадкового процесу зміни в часі метрологічних характеристик меж поля допуску [2, 3].

Разом із тим, у процесі експлуатації інформаційно-вимірювальних систем виникає вплив численних дестабілізуючих факторів, зокрема змін умов навколишнього середовища, старіння елементної бази, похибок вимірювань і збоїв у передаванні та обробці даних. Це призводить до зниження точності результатів вимірювань і, як наслідок, до прийняття неефективних рішень.

Відтак актуальним стає питання створення та удосконалення методів оцінки і забезпечення метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем, що дозволяють підвищити їх ефективність та стабільність функціонування і представлені у даному дослідженні.

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем зосереджені на підвищенні точності вимірювань, забезпеченні стабільності метрологічних характеристик у процесі експлуатації та розробці ефективних методів оцінювання похибок і невизначеності.

У роботах останніх років [1, 3] значна увага приділяється проблемам забезпечення метрологічної надійності на етапі проектування ІВС. Зокрема, показано, що використання математичних моделей та формалізованого опису процесів перетворення сигналів дозволяє прогнозувати метрологічні характеристики систем ще до їх фізичної реалізації. У дослідженнях [5] також підкреслюється, що ключовим фактором є врахування впливу аналого-цифрових перетворювачів, які суттєво визначають загальну похибку системи.

Важливим напрямом є розробка методів контролю та підтримання метрологічної надійності в процесі експлуатації. Сучасні підходи базуються на використанні методів діагностики, автоматизованого контролю та статистичної обробки результатів вимірювань. Зокрема [4], запропоновано методи контролю функціонування ІВС, що дозво-

ляють оперативно виявляти відхилення метрологічних характеристик і забезпечувати своєчасне калібрування вимірювальних каналів.

Окрему групу досліджень [6] становлять роботи, присвячені організації метрологічного забезпечення ІВС. У них розглядаються питання структурування вимірювальних каналів, стандартизації процедур повірки та оптимізації метрологічного обслуговування. Встановлено, що комплексний підхід до організації метрологічного забезпечення дозволяє суттєво підвищити надійність функціонування систем у реальних умовах експлуатації.

У сучасних публікаціях [10] також активно досліджуються статистичні методи оцінювання метрологічної надійності, зокрема методи дисперсійного аналізу, які застосовуються для оцінювання стабільності параметрів ІВС та виявлення джерел похибок. Це дозволяє підвищити обґрунтованість прийняття рішень щодо технічного стану системи та необхідності її калібрування.

Суттєвий розвиток отримали підходи, пов'язані з цифровізацією та інтеграцією інформаційно-вимірювальних систем у складні технічні комплекси [12, 15]. Сучас-

ні дослідження орієнтовані на створення розподілених ІВС, у яких особливу роль відіграють методи дистанційного калібрування, самодіагностики та забезпечення простежуваності вимірювань. У цьому контексті актуальними є питання оцінювання невизначеності вимірювань та забезпечення єдності вимірювань у цифрових середовищах [11, 13].

Теоретичні та практичні дослідження [2] свідчать про те, що, метрологічна надійність ІВС визначається в основному метрологічною надійністю аналогових блоків (АБ), які формують їхній склад. Саме в аналогових блоках протікають основні процеси обробки та перетворення вимірюваних фізичних величин.

Доведено [3], що елементна база (ЕБ),

що становить аналогові блоки, має тенденцію до старіння, і, як результат, до відхилення значень своїх параметрів від номінальних. Це призводить до спотворення вихідних сигналів ІВС, а отже, до зростання похибки вимірювання δ , що є основною метрологічною характеристикою будь-яких вимірювальних засобів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, залишається низка невирішених питань. Зокрема, потребують подальшого розвитку методи комплексної оцінки метрологічної надійності ІВС з урахуванням впливу зовнішніх факторів, старіння елементів та змін режимів роботи. Також актуальним є вдосконалення методів адаптивного метрологічного забезпечення, які враховують змінні умови експлуатації.

2. Постановка проблеми

Вплив на інформаційно-вимірювальні системи зовнішніх дестабілізуючих факторів навколишнього середовища значно прискорює процеси старіння елементної бази аналогових блоків, що призводить до зниження метрологічного ресурсу як основного показника метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем.

Таким чином, мають місце два основних завдання дослідження:

1) розробка методу оцінки метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем на етапі проектування з урахуванням впливу зовнішніх факторів навколишнього середовища;

2) розробка методу підвищення метрологічної надійності ІВС на етапі їх експлуатації, що реалізується власне у

структурі інформаційно-вимірювальної системи.

Завдання оцінки метрологічної надійності ІВС вирішується шляхом побудови математичних моделей, що пов'язують процеси зміни метрологічних характеристик ІВС із зміною параметрів комплексуючих елементів досліджуваних аналогових блоків, а також на математичному моделюванні залежностей параметрів елементної бази аналогових блоків від зовнішніх дестабілізуючих факторів навколишнього середовища.

Метою роботи є реалізація методів оцінки та підвищення метрологічного ресурсу як основного показника метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем на етапах їх проектування та експлуатації.

3. Виклад основного матеріалу

Оцінка метрологічної надійності при проектуванні аналогових блоків ІВС здійснюється з використанням методу аналітико-імовірнісного прогнозування [1-3]. В основу даного методу покладено аналіз нестационарних випадкових процесів зміни в часі метрологічних характеристик аналогових блоків ІВС на основі їх математичних моделей. Такі математичні моделі будуються з використанням статистичного моделювання значень метрологічних характеристик за даними про зміну

параметрів елементної бази аналогових блоків у процесі подальшої експлуатації.

В даному дослідженні в якості основних факторів навколишнього середовища розглядаються температура T , вологість F , тиск P і радіаційний вплив E .

Початковим етапом методу оцінки метрологічної надійності аналогових блоків ІВС є побудова математичних моделей функціонування блоку, що досліджується:

$$y(\vec{\xi}, \vec{\varphi}, t) = f(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}, t) \quad (1)$$

де $y(\vec{\xi}, \vec{\varphi}, t)$ – значення вихідного сигналу аналогових блоків; x – вхідний сигнал; t – час експлуатації ІВС; $\vec{\xi} = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n\}$ – вектор параметрів комплексуючих елементів, n – кількість елементів аналогових блоків;

$\vec{\varphi} = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m\}$ – вектор дестабілізуючих факторів навколишнього середовища, m – кількість даних факторів.

Далі проводиться моделювання елементної бази розглянутого аналогового блоку:

$$\xi_j(\vec{\varphi}, t) = f(\vec{\varphi}, t, \xi_{0j}) \quad (2)$$

Тут $\xi_j(\vec{\varphi}, t)$ – значення параметру j -го комплектуючого елементу аналогового блоку в момент часу t і при впливі факторів навколишнього середовища $\vec{\varphi}$; ξ_{0j} – номінальне значення даного елементу, $j = 1, \dots, n$.

Наступним етапом є побудова математичної моделі метрологічних характеристик аналогових блоків у вигляді:

$$S(\vec{\xi}, \vec{\varphi}, t) = f(x, \vec{\xi}, \vec{\varphi}, t). \quad (3)$$

Як уже зазначалося вище, основними факторами навколишнього середовища є температура T , вологість F , тиск P і радіаційний фон E . Тоді вираз (3) набуде наступного вигляду:

$$S = f(x, \vec{\xi}, T, F, P, E, t). \quad (4)$$

Модель (4) є важливою складовою вихідних даних для проведення процедури статистичного моделювання, що полягає в послідовному розрахунку характеристик закону розподілу значень параметрів елементної бази досліджуваних аналогових блоків та моделюванні метрологічних характеристик у різних тимчасових перерізах області контролю [2, 7]. Результатом даної процедури є сукупність значень математичного очікування метрологічних характеристик аналогових блоків у різні моменти часу експлуатації $m_s(t_1), \dots, m_s(t_i), \dots, m_s(t_K)$ і значень середньоквадратичного відхилення $\sigma_s(t_1), \dots, \sigma_s(t_i), \dots, \sigma_s(t_K)$ при варіюванні значень зовнішніх факторів навколишнього середовища [1-3], $i=1, \dots, K$, K – число тимчасових перерізів в області контролю.

За результатами статистичного моделювання будується математична модель змін у часі метрологічних характеристик виду [2-4]:

$$\begin{cases} m_s(T, F, P, E, t), \\ \psi_{\pm\sigma}(T, F, P, E, t) = \\ = m_s(T, F, P, E, t) + c \cdot \sigma_s(T, F, P, E, t) \end{cases} \quad (5)$$

де c – коефіцієнт, що вибирається в залежності від рівня довірчої ймовірності, $c = 3$ при $P = 0,9973$ з урахуванням нормального закону розподілу метрологічної характеристики.

Екстраполяцією залежностей (5) на область майбутніх значень часу експлуатації оцінюється метрологічний ресурс досліджуваного аналогового блоку як основний показник метрологічної надійності ІВС. Точність результатів прогнозування, очевидно, залежить від адекватності побудованих математичних моделей для елементної бази досліджуваного блоку.

Таким чином, пропонується вирішувати завдання оцінки метрологічної надійності аналогового блоку ІВС на етапі їх проектування.

Другим не менш важливим завданням є розробка методу підвищення метрологічної надійності ІВС. Здійснювати цей метод пропонується на етапі експлуатації ІВС із застосуванням математичної моделі (5), розробленої на етапі проектування аналогових блоків ІВС. Метод ґрунтується на введенні в ІВС автономної підсистеми метрологічного контролю [4–6], що реалізується із застосуванням окремих датчиків, які вимірюють значення параметрів навколишнього середовища, і мікропроцесорного пристрою, що здійснює обробку вимірювальних процедур.

Такий підхід забезпечить ряд переваг:

- контроль метрологічних характеристик ІВС протягом усього періоду експлуатації з урахуванням впливу зазначених зовнішніх дестабілізуючих факторів навколишнього середовища;
- побудова та коригування математичної моделі зміни у часі метрологічних характеристик з урахуванням параметрів навколишнього середовища;
- контроль дрейфу МХ та можливість достовірного прогнозування моменту настання метрологічної відмови;
- оптимальне призначення термінів проведення профілактичних робіт та чергових перевірок.

При реалізації запропонованого методу проводиться обчислення похибки при вимірюванні, і далі обчислюється

відповідна величина поправки, що компенсує цю похибку. На вхід аналогового блоку подається зразковий сигнал $x_{oi}(t)$ завчасно відомого значення [2]. Мікропроцесорний пристрій (МПП) порівнює вихідне значення зразкового сигналу $y_{oi}(t)$ і його справжню величину $x_{oi}(t)$. За отриманими даними МПП обчислює основну відносну похибку вимірювання δ . Структуру

такої підсистеми показано на рис. 1, у якій: К – комутаційний пристрій; ПП – первинні перетворювачі; П – підсилювач; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; МПП – мікропроцесорний пристрій; ПФЗС – пристрій формування зразкових сигналів; R_M – оператор масштабування; R_F^{-1} – оператор градувального перетворення; $R_{кор}$ – оператор корекції.

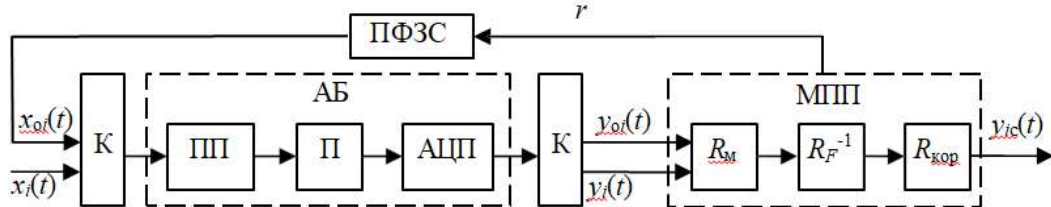


Рис. 1 – Структура системи формування зразкових сигналів

Fig. 1 – Structure of the sample signal generation system

На пристрій комутації одночасно подаються зразковий $x_{oi}(t_i)$ і вимірюваний $x_i(t_i)$ сигнали, що відповідають моменту часу t_i . Далі ці сигнали перетворюються в досліджуваному аналоговому блоці, і на виході аналогового блоку формуються виміряні значення зразкового $y_{oi}(t_i)$ і досліджуваного $y_i(t_i)$ сигналів. За даними значеннями обчислюється основна відносна похибка вимірювання зразкового сигналу $\delta_{oi}(t_i)$:

$$\delta_{oi}(t_i) = \frac{y_{oi}(t_i) - x_{oi}(t_i)}{x_{oi}(t_i)}, \quad i = 1, \dots, k, \quad (6)$$

де k – число тимчасових перерізів, у яких відбувається вимірювання.

Корекція вимірюваного сигналу $y_i(t_i)$ здійснюється оператором $R_{кор}$ з використанням обчисленого за зразковим сигналом значення похибки $\delta_{oi}(t_i)$. У результаті на виході ІВС формується скоригований сигнал $y_{ic}(t_i)$. Нижче алгоритм корекції розглянуто докладніше.

Вирахувавши похибка вимірювання $\delta_{oi}(t_i)$ для зразкового сигналу $x_{oi}(t_i)$ відповідно з (6), справедливо використовувати цю величину і для робочого сигналу $x_i(t_i)$ [4-6], тобто, приймаємо, що $\delta_i(t_i) = \delta_{oi}$

(t_i). Тоді дійсне значення вимірюваної величини $y_{id}(t_i)$ обчислюється за таким виразом:

$$\delta_i(t_i) = \frac{y_i(t_i) - y_{id}(t_i)}{y_{id}(t_i)} \quad (7)$$

Звідси виходить наступне:

$$y_{id}(t_i) = \frac{y_i(t_i)}{\delta_i(t_i) + 1} \quad (8)$$

Далі розраховується значення основної абсолютної похибки $\Delta_i(t_i)$:

$$\Delta_i(t_i) = y_{id}(t_i) - y_i(t_i) \quad (9)$$

Розраховане значення $\Delta_i(t_i)$ записується у записуючий пристрій ІВС для подальшого аналізу змін метрологічних характеристик.

На наступному етапі здійснюється формування відповідної поправочної величини $z_i(y_i)$. Величина поправки дорівнює абсолютній похибці ІВС зі зворотним знаком:

$$z_i(y_i) = -\Delta_i(t_i).$$

Далі поправочне значення $z_i(y_i)$ розраховується з виміряної величини $y_i(t_i)$, в результаті чого на виході ІВС формується скориговане значення цієї величини $y_{ic}(t_i)$:

$$y_{ic}(t_i) = y_i(t_i) - z_i(y_i). \quad (10)$$

Висновки

Запропонована методика має значну перевагу, яка полягає у можливості корекції моделі зміни в часі метрологічних характеристик аналогових блоків ІВС з урахуванням умов експлуатації. Для реалізації даної переваги необхідно записувати значення досліджуваних метрологічних характе-

стик, розраховані за математичними моделями на етапі проектування, а також фіксувати значення метрологічних характеристик, отриманих при реалізації методу з використанням зразкових сигналів на етапі експлуатації. Також має здійснюватися запис значень зовнішніх чинників

навколишнього середовища, відповідних значень метрологічних характеристик, таким чином, в інформаційно-вимірювальних системах відбувається формування бази даних, що містить усі вказані величини.

Отже, запропоновані доповнення

структури інформаційно-вимірювальної системи дозволяє на стадії експлуатації реалізувати метод оцінки і підвищення метрологічного ресурсу як основного показника метрологічної надійності аналогових блоків у інформаційно-вимірювальних системах загалом.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Денисюк В. Ю. Оцінка метрологічної надійності аналого-цифрового блоку перетворювача інформаційно-вимірювальних систем на етапі його проектування. *Приладобудування: стан і перспективи*: матеріали XXIV міжнар. наук.-техн. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 419–421.
2. Денисюк В. Ю. Проблеми забезпечення точності та метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем. *Приладобудування: стан і перспективи*: матеріали XXIII міжнар. наук.-техн. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. С. 345–349.
3. Яцук В. О., Яцук Ю. В. Забезпечення метрологічної надійності вимірювальних систем у реальному масштабі часу. *Вимірювальна техніка та метрологія*. Львів : Львівська політехніка, 2019. Т. 80, № 2. С. 64–72. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.02.064>
4. Науменко А., Бабіч О., Короткий Є. Аналіз методів організації метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем управління об'єктів. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. № 5(57). С. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.5.025>
5. Защепкіна Н. М., Шульга О. В., Наконечний О. А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 176 с.
6. Штефан І. Ю., Штефан Н. В. Проблеми метрологічного забезпечення інформаційно-вимірювальних систем. *Актуальні проблеми автоматики та приладобудування*. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. С. 176–177.
7. Distributed measurement system calibration method with automatic networking mechanism / Zhang Xiaohui, Zhang Jiaying, Liu Qing, Li Jintong, Jia Kun, Lin Binfeng. *Measurement Science and Technology*. 2024. Vol. 35. No 4. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad2149>
8. A fast calibration method for distributed measurement systems / Qing Liu, Jiaming Lv, Jiaying Zhang, Jintong Li, Jiawei Li, Ting Shang. *AIP Advances*. 2023. № 13 (9). 095213. DOI: <https://doi.org/10.1063/7.0001205>
9. ДСТУ EN ISO 10012:2022. Системи керування вимірюваннями. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання. [Чинний від 2023 -12-31]. Київ, 2023. (Інформація і документація).
10. Розвиток системи забезпечення метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки / М. Микійчук, Н. Лазаренко, С. Лазаренко, А. Різник. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. № 3. С. 53–57. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.03.053>
11. Вітковський В. Реалізація підходу з використанням характеристичних функцій для оцінювання невизначеності вимірювань. *Ukrainian Metrological Journal*. 2022. № 1. С. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258818>
12. Kok Gertjan, Marcel van Dijk. Measurement Uncertainty Evaluation: Differences Between Virtual Experiments and the Standardized Approach. *Metrology*. 2025. Vol. 5, no. 4. Pp. 59. DOI: <https://doi.org/10.3390/metrology5040059>
13. Кузьменко Т. М. Оцінювання невизначеності вимірювань лінійних розмірів при вимірюванні деталей точної механіки у випробувальних лабораторіях. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Vol. 32 (71), part 2, no 2. Pp. 8–12. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/02>

14. Коцюба А. М. Оцінювання невизначеності вимірювання за результатами контрольних вимірювань з використанням стандартних зразків. *Системи обробки інформації*. 2017. Вип. 6. С. 51-53.

15. Harris P. M., Cox M.G. On a Monte Carlo method for measurement uncertainty evaluation and its implementation. *Metrologia*. 2014, Vol. 51(4), P. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/4/S176>

Отримано: 06.04.2026 / Переглянуто: 13.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

ARTIUKH S., Candidate of Technical Sciences;

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail: s.m.artyh@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0804-6313>

ARTIUKH A.,

e-mail nartyh17@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0396-0934>

KNIAZIEVA V., Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies

e-mail v.m.kniazieva@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3106-4897>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine*

METHODS FOR EVALUATING AND ENSURING THE METROLOGICAL RELIABILITY OF INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

This article examines modern methods for evaluating and ensuring the metrological reliability of information and measurement systems. The relevance of this topic stems from the widespread use of information and measurement systems in many industrial and manufacturing sectors, with particular emphasis placed on ensuring a high level of their metrological reliability.

The aim of this study is to implement methods for assessing and improving metrological life, as the primary indicator of the metrological reliability of information and measurement systems during their design and operation phases. The task of assessing the metrological reliability of information and measurement systems is solved using an analytical-probabilistic forecasting method, which includes mathematical modeling of the process of changes over time in the metrological characteristics of information measurement systems over time, as well as statistical modeling that accounts for the influence of external destructive environmental factors. The task of improving the metrological reliability of information and measurement systems is solved by introducing a metrological control subsystem into their structure.

This paper provides a detailed description of all stages of mathematical modeling involved in implementing a method for assessing the metrological reliability of information and measurement systems, and proposes an optimal structure for such systems, including a metrological control subsystem with a function for automatic correction of measurement results. The element base on which the metrological control and measurement result correction subsystem is optimally implemented is proposed and described in detail.

The results obtained can be used in the design, modernization, and operation of information and measurement systems to ensure a high level of accuracy, reliability, and efficiency in their operation.

KEYWORDS: analog unit, information and measurement system, metrological reliability, metrological characteristic, metrological lifetime.

In cites: Artiukh S., Artiukh A., Kniazieva V. (2026). Methods for evaluating and ensuring the metrological reliability of information and measurement systems. *Engineering*, (37), 24-31. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-02> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Denysiuk, VYu 2025, 'Otsinka metrolohichnoi nadiinosti analoho-tsyfrovoho bloku peretvoriuvacha informatsiino-vymiriuvalnykh system na etapi yoho proiektuvannia' [Evaluation of metrological reliability of the analog-to-digital converter block of information-measuring systems at the design stage], *Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy: materialy XXIV mizhnar. nauk.-tekhn. Konf*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, Pp. 419–421.
2. Denysiuk, VYu 2024, 'Problemy zabezpechennia tochnosti ta metrolohichnoi nadiinosti informatsiino-vymiriuvalnykh system' [Problems of ensuring the accuracy and metrological reliability of information and measuring systems], *Pryladobuduvannia: stan i perspektyvy: materialy XXIII mizhnar. nauk.-tekhn. Konf*, KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, Pp. 345–349.
3. Yatsuk, VO & Yatsuk, YuV 2019, 'Zabezpechennia metrolohichnoi nadiinosti vymiriuvalnykh system u realnomu masshtabi chasu' [Ensuring metrological reliability of measuring systems in real time], *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, Vol. 80, no 2, Pp. 64–72. <https://doi.org/10.23939/istcm2019.02.064> (in Ukraine)
4. Naumenko, A, Babich, O & Korotkyi, Ye 2019, 'Analiz metodiv orhanizatsii metrolohichnoho zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system upravlinnia obiektiv' [Analysis of methods for organizing metrological support of information-measuring systems for facility management], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no 5(57), Pp. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.5.025> (in Ukraine)
5. Zashchepkina, NM, Shulha, OV & Nakonechnyi, OA 2021, *Metrolohichne zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system* [Metrological security of information and measuring systems], KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv,
6. Shtefan, IYu & Shtefan, NV 2016, 'Problemy metrolohichnoho zabezpechennia informatsiino-vymiriuvalnykh system' [Problems of metrological security of information and measuring systems], *Aktualni problemy avtomatyky ta prylobuduvannia*, Pp. 176–177.
7. Zhang, X, Zhang, J, Liu, Q & Li, J 2024, 'Distributed measurement system calibration method with automatic networking mechanism', *Measurement Science and Technology*, Vol. 35, no 4, Pp. 57-72. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad2149>
8. Liu, Q, Zhang, J & Shang, T 2023, 'A fast calibration method for distributed measurement systems', *AIP Advances*, no 13 (9), 095213. DOI: <https://doi.org/10.1063/7.0001205>
9. DSTU EN ISO 10012:2022. Systemy keruvannia vymiriuvanniamy. Vymohy do protsesiv vymiriuvannia ta vymiriuvalnogo obladnannia (Chynnyi vid 2023-12-31) [Measurement control systems. Requirements for measurement processes and measurement equipment], Kyiv.
10. Mykyichuk, M, Lazarenko, N, Lazarenko, S & Riznyk, A 2019, 'Rozvytok systemy zabezpechennia metrolohichnoi nadiinosti zasobiv vymiriuvanoi tekhniki' [Development of a system for ensuring metrological reliability of measuring techniques], *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, no 3, Pp. 53–57. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcm2019.03.053> (in Ukraine)
11. Vitkovskiy, V 2022, 'Realizatsiia pidkhotu z vykorystanniam kharakterystychnykh funksi dlia otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvan' [Implementation of the approach using characteristic functions to estimate the uncertainty of measurements], *Ukrainian Metrological Journal*, no 1, Pp. 38-43. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2022.258818> (in Ukraine)
12. Kok, G & van Dijk, M 2025, 'Measurement uncertainty evaluation using virtual experiments', *Metrology*, Vol. 5(4), Pp. 56-64. DOI: <https://doi.org/10.3390/metrology5040059>
13. Kuzmenko, TM 2021, 'Otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvan liniinykh rozmiriv pry vymiriuvanni detalei tochnoi mekhaniky u vyprobuvalnykh laboratoriiakh' [Estimation of the uncertainty of linear measurement measurements when measuring precision mechanical parts in testing laboratories], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky*, Vol. T. 32 (71), part. 2, no 2, Pp. 8-12. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/02> (in Ukraine)
14. Kotsiuba, AM 2017, 'Otsiniuvannia nevyznachenosti vymiriuvannia za rezultatamy kontrolnykh vymiriuvan z vykorystanniam standartnykh zrazkiv' [Estimation of the uncertainty of the measurement based on the results of control measurements using standard samples], *Systemy obrobky informatsii*, iss. 6, Pp. 51-53.
15. Harris, PM & Cox, MG 2014, 'On a Monte Carlo method for measurement uncertainty evaluation and its implementation', *Metrologia*, Vol. 51(4), Pp. 176–182. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/4/S176>

Submission received: 04.06.2026/Revised: 05.13.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03>

УДК 621.039.58:621.313

¹БРОВКО К. Ю., кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: brovkokonstantin@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

¹БУДАНОВ П. Ф., кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4519-3879>

¹ВОЙТЕНКО С. М.,

асистент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: voitenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8829-2647>

¹ВИНОКУРОВА Н. Д.,

асистент кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: v.natasha.d@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>

¹ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ О. В.

аспірант кафедри електротехніки та електроенергетики

e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ FESTO ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС

У статті досліджено можливості застосування лабораторного обладнання компанії Festo для експериментального моделювання та аналізу електротехнічних систем атомних електростанцій із реакторами типу ВВЕР-1000. Актуальність роботи обумовлена необхідністю підвищення надійності та стійкості функціонування систем власних потреб енергоблоків, які забезпечують безперервну роботу систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем тепловідведення, охолодження активної зони та систем безпеки. Порушення електроживлення або відхилення параметрів електричної енергії можуть призводити до зниження ефективності функціонування технологічного обладнання та створювати потенційні загрози безпечній експлуатації енергоблоку.

У роботі запропоновано експериментально-аналітичний підхід до дослідження електромеханічних процесів у системах автоматизованого електропривода з урахуванням динамічних характеристик, нелінійності навантаження та впливу перехідних і аварійних режимів. Розроблено математичну модель асинхронного автоматизованого електропривода насосного агрегату, яка базується на рівняннях електромеханічної рівноваги, залежностях споживаної потужності від швидкості обертання, а також аналізі активної потужності в колах змінного струму. Особливу увагу приділено врахуванню інерційних властивостей механічної системи та впливу зміни напруги живлення на електромагнітний момент і стабільність роботи привода.

Проведено експериментальні дослідження на лабораторному стенді Festo, що дозволило змодельовати штатні, перехідні та аварійні режими роботи, зокрема просідання напруги, перевантаження та втрату зовнішнього електропостачання. У ході експерименту отримано залежності між напругою живлення, швидкістю обертання електродвигуна та споживаною потужністю, які підтверджують адекватність побудованих теоретичних моделей та їх придатність для опису реальних процесів у системах власних потреб. Виконано оцінку похибок вимірювань, що дозволило встановити їх допустимий рівень та підтвердити достовірність отриманих результатів.

Показано, що використання лабораторних комплексів Festo дозволяє ефективно відтворювати критичні режими роботи електротехнічних систем, характерні для енергоблоків типу ВВЕР-1000, включаючи сценарії порушення електроживлення та динамічні перехідні процеси. Це має важливе значення для підвищення рівня безпеки, надійності та ефективності експлуатації атомних електростанцій. Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі підготовки інженерного персоналу, при проведенні наукових досліджень, а також для імітаційного моделювання аварійних ситуацій в енергетичних системах.



КЛЮЧОВІ СЛОВА: електротехнічні системи; атомна електростанція; автоматизований електропривод; аварійні режими; лабораторне обладнання Festo.

Як цитувати: Бровко К.Ю., Буданов П.Ф., Войтенко С. М., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. Лабораторне обладнання Festo як інструмент експериментального моделювання електротехнічних систем енергоблоків АЕС. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 32-48. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03>

Вступ

Сучасні атомні електростанції (АЕС), зокрема енергоблоки з реакторами типу ВВЕР-1000, функціонують в умовах підвищених вимог до надійності, безпеки та ефективності експлуатації. Особливу роль у забезпеченні стабільної роботи енергоблоку відіграють електротехнічні системи власних потреб, які забезпечують функціонування систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем тепловідведення, охолодження активної зони та інших критично важливих елементів. Порушення режимів електроживлення, зокрема просідання напруги, перевантаження або повна втрата зовнішнього електропостачання, можуть призводити до зниження ефективності роботи технологічного обладнання та створювати загрозу безпечній експлуатації енергоблоку.

Проблема дослідження полягає у створенні методичного підходу до моделювання електромеханічних процесів у системах автоматизованого електропривода енергоблоків АЕС, який дозволяє враховувати нелінійність навантаження, інерційні властивості механічних систем та вплив аварійних режимів. Основною складністю є забезпечення адекватності моделі реальним процесам, що відбуваються в електротехнічних системах, а також можливість відтворення цих процесів у лабораторних умовах без ризику для обладнання.

Шлях вирішення зазначеної проблеми пропонується через використання лабораторного обладнання компанії Festo, яке дозволяє реалізувати експериментальне моделювання електротехнічних систем у поєднанні з математичними моделями. Лабораторні комплекси забезпечують можливість відтворення штатних, перехідних та аварійних режимів роботи систем автоматизованих електроприводів, зокрема сценаріїв просідання напруги, перевантаження та втрати зовнішнього електроживлення, що є критично важливими для аналізу стійкості

та надійності систем власних потреб.

Використання такого підходу дозволяє створити експериментально-аналітичну модель дослідження, яка інтегрує фізичні процеси, що відбуваються в електромеханічних системах, математичні залежності та результати вимірювань у єдину дослідницьку платформу. Це забезпечує можливість не лише аналізу поточного стану системи, але й дослідження її поведінки в умовах зміни параметрів та виникнення аварійних ситуацій.

У роботі вперше запропоновано інтегрований експериментально-аналітичний підхід до дослідження електротехнічних систем власних потреб енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000 на основі використання лабораторного обладнання Festo. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель поєднує математичний опис електромеханічних процесів із фізичним відтворенням штатних, перехідних та аварійних режимів роботи системи автоматизованого електропривода насосного агрегату.

Удосконалено методику моделювання аварійних режимів електропостачання систем власних потреб, яка, на відміну від відомих рішень, дозволяє враховувати нелінійність навантаження, інерційні властивості механічної системи та зміну параметрів електродвигуна при просіданні напруги. Набули подальшого розвитку методи експериментальної ідентифікації параметрів автоматизованого електропривода, що дозволяє уточнювати значення моменту інерції, коефіцієнтів механічних втрат та параметрів обмоток за результатами вимірювань.

Таким чином, застосування лабораторного обладнання Festo для моделювання електротехнічних систем енергоблоків типу ВВЕР-1000 є перспективним напрямом підвищення ефективності наукових досліджень, якості підготовки інженерних кадрів та рівня безпеки експлуатації АЕС.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасні АЕС, зокрема енергоблоки з реакторами типу ВВЕР-1000, функціонують в умовах підвищених вимог до надійності, безпеки та ефективності технологічних процесів. Одним із ключових елементів забезпечення стабільної роботи енергоблоку є електротехнічні системи власних потреб, які забезпечують функціонування систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання, систем охолодження, тепловідведення та безпеки. Відхилення параметрів електроживлення, зокрема просідання напруги, перевантаження або втрата зовнішнього електропостачання, можуть призводити до порушення роботи автоматизованих електроприводів і, як наслідок, до зниження ефективності або навіть відмови критично важливих систем.

Традиційні підходи до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, що базуються переважно на аналітичних методах та обмежених експериментальних дослідженнях, не забезпечують достатньої адекватності відтворення реальних динамічних процесів, особливо в аварійних режимах. Зокрема, вони не дозволяють повною мірою врахувати нелінійність навантаження систем автоматизованих електроприводів насосних агрегатів, інерційні властивості механічних систем, а також складні взаємозв'язки між електричними та механічними параметрами в перехідних процесах. Це створює науково-практичну проблему, що полягає у необхідності розробки інтегрованого підходу до дослідження електромеханічних систем, який забезпечує можливість адекватного моделювання штатних, перехідних та аварійних режимів роботи.

Важливість вирішення цієї проблеми визначається такими аспектами:

- необхідність розвитку методів експериментально-аналітичного моделювання електромеханічних процесів у складних технічних системах, що передбачає інтеграцію математичних моделей систем автоматизованих електроприводів, теорії електромеханічної динаміки та експериментальних даних. Це відкриває нові можливості для дослідження стійкості, надійності та динамічних характеристик електротехнічних систем енергетичних установок;
- потреба у створенні інструментів,

що дозволяють відтворювати аварійні режими роботи електротехнічних систем без ризику для реального обладнання, зокрема сценарії втрати зовнішнього електроживлення, просідання напруги та перевантаження. Це є важливим для підготовки персоналу, підвищення надійності систем власних потреб та зменшення ризику аварійних ситуацій на енергоблоках.

Одним із перспективних шляхів вирішення зазначеної проблеми є використання лабораторного обладнання компанії Festo, яке дозволяє реалізувати експериментальне моделювання електротехнічних систем у поєднанні з математичними моделями. Такий підхід забезпечує можливість створення інтегрованого дослідницького середовища, що включає:

- фізичні моделі електромеханічних процесів (асинхронний електродвигун трифазного струму 400/690 В; комплект елементів TP 1421: приводна техніка; серводвигун; набір елементів TP 1311: датчики виявлення об'єктів; навчальний модуль з частотним перетворювачем Sinamics G120);

- математичні моделі автоматизованих електроприводів (рівняння електромеханічної рівноваги; залежності потужності від швидкості; моделі ковзання; FluidSIM, Startdrive Basic);

- експериментальні дані, отримані в режимі реального часу з лабораторних стендів;

- засоби аналізу та обробки результатів для оцінки стійкості та надійності системи (двохканальний цифровий осцилограф, модель 798; панель оператора Basic (BOP-2); контролер Siemens S7-1516-3PN/DP)

Вирішення поставленої проблеми дозволяє досягти низки важливих наукових і практичних результатів, зокрема: підвищити адекватність моделювання електротехнічних процесів; забезпечити можливість дослідження аварійних режимів без ризику для обладнання; удосконалити методи аналізу динамічних характеристик систем автоматизованих електроприводів; підвищити ефективність підготовки інженерного персоналу; створити основу для подальшого розвитку методів моделювання

та цифровізації енергетичних систем.

Таким чином, застосування лабораторного обладнання Festo для дослідження електротехнічних систем енергоблоків типу ВВЕР-1000 є ефективним інструментом

вирішення комплексної науково-практичної проблеми, пов'язаної з моделюванням, аналізом та підвищенням надійності функціонування систем власних потреб АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженнях [1, 2] розглянуто питання моделювання електротехнічних систем енергетичних установок із використанням математичних моделей автоматизованих електроприводів. Автори обґрунтовують доцільність застосування аналітичних підходів для дослідження динамічних процесів у системах власних потреб. Перевагою робіт є глибокий теоретичний аналіз, проте відсутність експериментальної верифікації обмежує практичну значущість отриманих результатів.

У роботі [3] досліджено особливості функціонування автоматизованих електроприводів насосних агрегатів у складі енергоблоків атомних електростанцій, зокрема із реакторами типу ВВЕР-1000. Автори приділяють увагу впливу режимів електроживлення на стабільність роботи обладнання. Сильна сторона дослідження полягає у прикладній спрямованості, однак воно обмежене аналізом окремих режимів і не охоплює повною мірою аварійні сценарії.

У наукових працях [4, 5] представлено огляд сучасних методів дослідження електромеханічних систем, включаючи використання імітаційного моделювання та програмних середовищ. Роботи мають системний характер і дозволяють узагальнити існуючі підходи, проте не містять детального аналізу їх застосування у специфічних умовах атомної енергетики.

Автори дослідження [6] виконали аналіз динамічних характеристик асинхронних електродвигунів у перехідних режимах. Значну увагу приділено математичному опису електромеханічних процесів, що є важливим для дослідження стійкості систем. Водночас відсутність експериментальної перевірки результатів обмежує їх застосування у реальних умовах. У роботі [7] розглянуто використання лабораторного обладнання компанії Festo у навчальному процесі для дослідження електротехнічних систем. Перевагою є демонстрація можливостей модульних стендів для відтворення різних режимів роботи. Однак дослідження

має переважно освітній характер і не орієнтоване на аналіз складних енергетичних систем.

Статті [8, 9] присвячені дослідженню аварійних режимів у системах електропостачання, зокрема сценаріям втрати зовнішнього живлення. Автори аналізують вплив таких режимів на роботу автоматизованих електроприводів і систем безпеки. Практична значущість робіт є високою, проте відсутність експериментального моделювання обмежує можливість перевірки отриманих висновків. У публікації [10] розглянуто питання застосування імітаційного моделювання для дослідження електротехнічних процесів у енергетиці. Автори підкреслюють важливість поєднання математичних моделей та експериментальних даних. Водночас запропоновані підходи потребують адаптації до конкретних технічних платформ.

Робота [11] демонструє використання навчально-дослідницьких стендів для моделювання електромеханічних систем. Значним досягненням є практична реалізація експериментальних досліджень, однак відсутній зв'язок із реальними енергетичними об'єктами, що знижує прикладну значущість результатів. У дослідженнях [12, 13] проаналізовано методи оцінки надійності електротехнічних систем енергетичних установок. Автори пропонують підходи до аналізу стійкості та прогнозування відмов. Проте результати носять теоретичний характер і не підкріплені експериментальними даними.

Статті [14, 15] присвячені інтеграції фізичних та математичних моделей у єдину дослідницьку систему. Перевагою є комплексні підходи до аналізу технічних процесів, однак питання реалізації таких систем у лабораторних умовах розглянуто недостатньо.

Аналіз джерел [1 – 15] показав, що сучасні дослідження у сфері електротехнічних систем енергетичних установок спрямовані на розвиток методів математичного

моделювання, аналіз динамічних процесів та підвищення надійності роботи обладнання. Водночас виявлено низку суттєвих обмежень: більшість робіт мають або суто теоретичний характер, або обмежуються окремими експериментальними дослідженнями; недостатньо уваги приділяється поєднанню математичного моделювання з експериментальною верифікацією; відсутні універсальні підходи до моделювання аварійних режимів у системах власних потреб енергоблоків, зокрема для реакторів типу ВВЕР-1000.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка експериментально-аналітичного підходу до дослідження електротехнічних систем АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000 на основі використання лабораторного обладнання компанії Festo, що дозволяє моделювати електромеханічні процеси, аналізувати динамічні режими роботи систем автоматизованих електроприводів та оцінювати їхню стійкість і надійність в умовах змін параметрів електроживлення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- аналіз існуючих підходів до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, зокрема систем власних потреб АЕС, виявлення обмежень традиційних методів математичного моделювання та експериментальних досліджень, а також обґрунтування доцільності використання лабораторного обладнання для відтворення реальних режимів роботи систем

Це свідчить про необхідність розробки інтегрованого експериментально-аналітичного підходу, який поєднує математичні моделі систем автоматизованих електроприводів із можливостями лабораторного обладнання Festo для відтворення реальних режимів роботи електротехнічних систем. Такий підхід дозволяє підвищити достовірність досліджень, забезпечити аналіз аварійних режимів та розширити можливості практичного застосування отриманих результатів.

автоматизованих електроприводів;

- розробка та реалізація експериментально-аналітичної моделі системи автоматизованого електропривода насосного агрегату, що включає математичний опис електромеханічних процесів, урахування динамічних характеристик і нелінійності навантаження, а також проведення експериментальних досліджень на базі стендів Festo з метою моделювання штатних, перехідних та аварійних режимів роботи, включаючи просідання напруги та втрату зовнішнього електроживлення.

Реалізація зазначених завдань забезпечує формування комплексного підходу до дослідження електротехнічних систем енергоблоків, що дозволяє підвищити достовірність моделювання електромеханічних процесів, розширити можливості аналізу аварійних режимів та створити науково обґрунтовану основу для підвищення надійності та безпеки експлуатації АЕС.

Виклад основного матеріалу

Розглядаючи електротехнічні системи енергоблоків, особливо системи власних потреб АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000, слід підкреслити їхню надзвичайну складність, багаторівневу структуру та високу відповідальність за забезпечення безпечної та безперервної роботи технологічного процесу. У таких системах функціонують потужні системи автоматизованих електроприводів насосів першого та другого контурів, систем охолодження, вентиляції, а також допоміжне обладнання, від якого безпосередньо залежить тепловий баланс

реакторної установки. У цьому контексті дослідження електротехнічних систем не може обмежуватися лише спрощеними аналітичними підходами, оскільки реальні процеси характеризуються суттєвою нелінійністю, багатозв'язністю та наявністю збурень різної природи.

Традиційно для аналізу електротехнічних систем використовуються математичні моделі, що базуються на рівняннях електричних кіл та електромеханіки. Зокрема, динаміка автоматизованого електропривода може бути описана системою диференціальних

рівнянь, які враховують як електричну, так і механічну складові процесу.

Для асинхронного електропривода насосного агрегату, характерного для систем власних потреб АЕС, механічна частина описується залежністю між електромагнітним моментом двигуна та моментом навантаження насоса. З урахуванням квадратичного характеру навантаження насосного обладнання момент навантаження визначається як $M_n = k\omega^2$, де k – коефіцієнт навантаження насосного агрегату, ω – кутова швидкість ротора. Зазначена залежність свідчить, що навіть незначне зниження швидкості обертання призводить до суттєвого зменшення продуктивності насоса та зміни режиму роботи системи охолодження.

Узагальнено електромеханічний баланс можна записати у вигляді (1):

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e(i, \psi) - M_n(\omega, t) - B\omega, \quad (1)$$

де J – момент інерції; ω – кутова швидкість; M_e – електромагнітний момент, який залежить від струму та потокомчеплення; M_n – момент навантаження, що є функцією часу та швидкості; B – коефіцієнт механічних втрат. Електрична частина системи в загальному випадку описується рівнянням (2):

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e(\omega, \psi), \quad (2)$$

де u – напруга живлення; R – активний опір; L – індуктивність; i – струм; $e(\omega, \psi)$ – електрорушійна сила, що залежить від швидкості обертання та магнітного потоку. Для аналізу впливу відхилень напруги враховано, що навіть короточасне її просідання на 15–20 % є особливо небезпечним для електроприводів насосного обладнання, яке забезпечує циркуляцію теплоносія та функціонування систем безпеки.

Для більш точного опису динаміки асинхронного електропривода доцільно враховувати залежність електромагнітного моменту від ковзання ротора. У загальному випадку електромагнітний момент асинхронного двигуна визначається виразом (3):

$$M_e = \frac{3U_1^2 R_2 / s}{\omega_0 \left[(R_1 + R_2 / s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} \quad (3)$$

де U_1 – фазна напруга живлення; R_1 , R_2 – активні опори статора та ротора; X_1 , X_2 – індуктивні опори; s – ковзання; ω_0 – синхронна кутова швидкість. Наведена залежність показує, що при зменшенні напруги живлення або збільшенні ковзання електромагнітний момент зменшується, що призводить до погіршення стійкості роботи електропривода.

Ковзання ротора визначається різницею між синхронною та фактичною швидкістю обертання двигуна (4):

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (4)$$

де n_0 – синхронна швидкість, n – фактична швидкість ротора. Для насосних електроприводів систем власних потреб АЕС різке зростання ковзання є індикатором передаварійного режиму.

Подібні моделі дозволяють аналізувати динаміку системи, однак у реальних умовах їх застосування пов'язане з низкою суттєвих обмежень. По-перше, більшість аналітичних моделей базується на низці припущень щодо лінійності параметрів, що не відповідає реальним умовам експлуатації. У процесі роботи системи автоматизованого електроприводу відбуваються зміни параметрів під впливом температури, старіння ізоляції, магнітного насичення, що призводить до відхилення фактичних характеристик від розрахункових. По-друге, у системах власних потреб енергоблоків АЕС спостерігаються складні взаємодії між електричною мережею та механічним навантаженням, що мають нелінійний та стохастичний характер. По-третє, значна кількість зовнішніх впливів (коливання напруги, гармонійні спотворення, аварійні режими) ускладнює точне аналітичне описання системи. Окремою проблемою є дослідження перехідних процесів, зокрема пускових режимів, режимів короточасних перевантажень, а також аварійних ситуацій, таких як провали напруги або повна втрата

живлення. У таких умовах система переходить у нелінійні режими, де класичні аналітичні методи втрачають свою ефективність або вимагають значних спрощень, що знижує достовірність результатів.

Експериментальні методи дослідження, зокрема натурні випробування, також мають суттєві обмеження. Основними з них є висока вартість проведення експериментів, тривалість підготовки, а також неможливість відтворення небезпечних або аварійних режимів у реальних умовах через вимоги ядерної та електротехнічної безпеки. Це особливо актуально для систем, що забезпечують безпечну експлуатацію АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

У зв'язку з цим значного розвитку набувають лабораторні методи дослідження, що передбачають використання спеціалізованих стендів для відтворення режимів

роботи систем автоматизованого електроприводу. Такі стенди дозволяють моделювати як усталені, так і перехідні режими, а також аварійні ситуації, без ризику для реального обладнання. Важливою перевагою лабораторного підходу є можливість багаторазового відтворення однакових умов експерименту, що забезпечує високу відтворюваність результатів.

Сучасні лабораторні комплекси часто інтегрують апаратні та програмні засоби, включаючи програмовані логічні контролери, цифрові сигнальні процесори та системи збору даних. Це дозволяє реалізувати підхід *hardware-in-the-loop*, у межах якого математична модель може взаємодіяти з реальним фізичним об'єктом у замкненому контурі керування. Узагальнена структура такої системи показана на рис. 1.

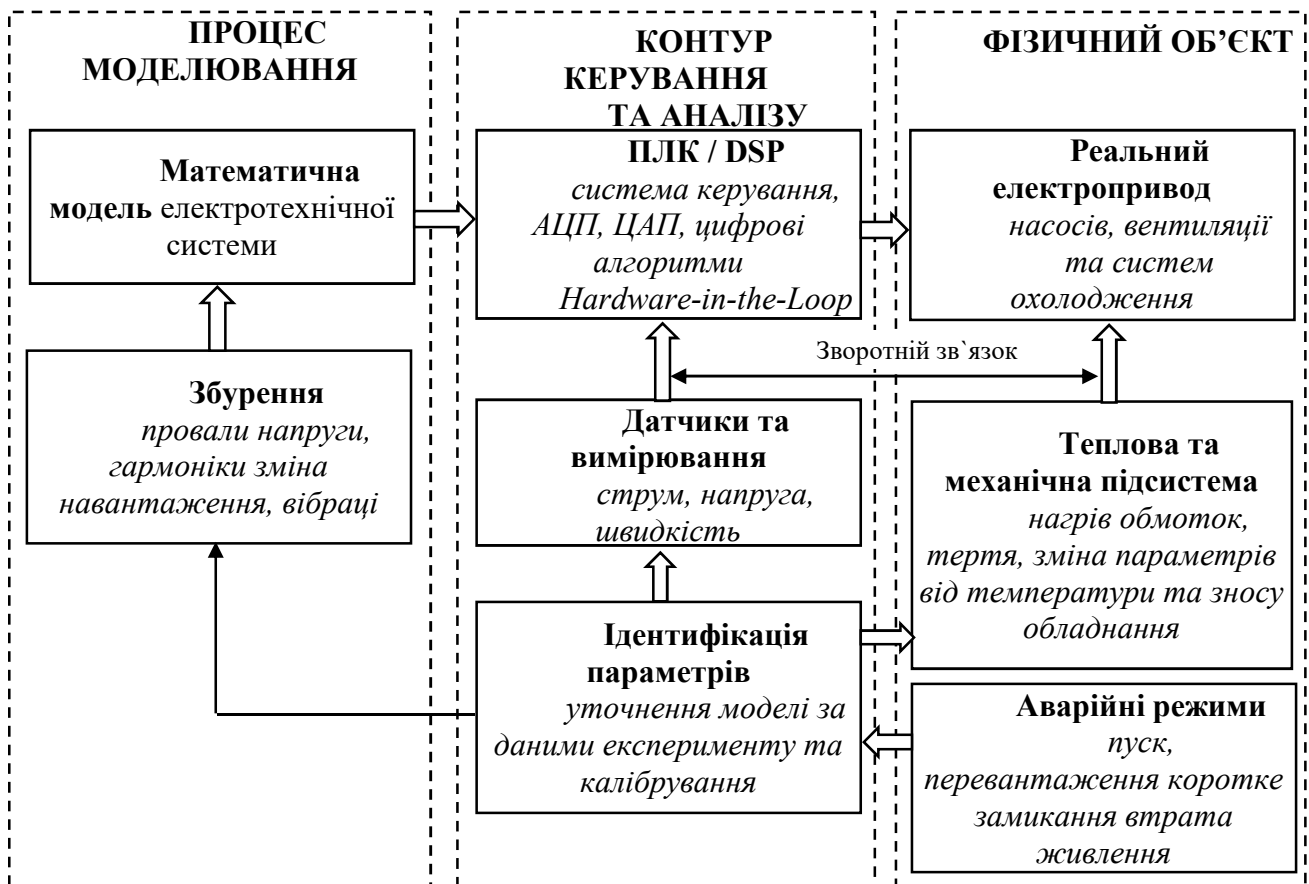


Рис. 1 – Узагальнена структура системи *hardware-in-the-loop* для дослідження електротехнічних систем власних потреб енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000

Fig. 1 – Generalized structure of the *hardware-in-the-loop* system for studying the electrical systems of the own needs of a nuclear power plant unit with a VVER-1000 reactor

Застосування лабораторного обладнання в дослідженні електротехнічних систем дозволяє перейти від суто теоретичних моделей до практично орієнтованого підходу, в якому математичні залежності не лише перевіряються, але й коригуються відповідно до реальних фізичних процесів. У реальних умовах експлуатації систем автоматизованого електроприводу параметри системи є невизначеними або змінними: активні та індуктивні опори залежать від температури, магнітні характеристики – від насичення, механічні параметри – від зносу та навантаження. Саме тому лабораторні стенди дозволяють виконати ідентифікацію параметрів системи, використовуючи експериментально отримані дані.

У процесі ідентифікації уточнюються такі параметри, як момент інерції, коефіцієнти тертя, електричні параметри обмоток та магнітні характеристики. Це дозволяє зменшити розбіжність між моделлю та реальним об'єктом, що особливо важливо для складних систем, де навіть незначна похибка параметрів може призводити до суттєвих відхилень у динаміці. В умовах енергоблоків типу ВВЕР-1000 така точність є критичною, оскільки автоматизовані електроприводи забезпечують роботу систем безпеки та тепловідведення.

Для кількісної оцінки адекватності моделі використовувалася відносна похибка між експериментальними та розрахунковими значеннями швидкості обертання і потужності. Відносна похибка визначалася за виразом (5):

$$\delta = \frac{|y_{\text{exp}} - y_{\text{mod}}|}{y_{\text{exp}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де y_{exp} – експериментальне значення параметра; y_{mod} – значення, отримане за математичною моделлю. У ході дослідження встановлено, що середня похибка моделі не перевищує 4.6 %, що підтверджує її достатню точність для аналізу режимів роботи електротехнічних систем енергоблоку АЕС.

Крім перевірки адекватності моделей, лабораторні дослідження дозволяють детально вивчати взаємодію між різними фізичними підсистемами. Електрична підсистема визначає формування електромагнітного моменту, механічна – перетворення

цього моменту у рух, а теплова – впливає на довготривалу стабільність роботи. У реальному електроприводі ці процеси взаємопов'язані: наприклад, підвищення температури призводить до збільшення опору обмоток, що змінює струм і, відповідно, електромагнітний момент. Це можна формалізувати через систему зв'язаних диференціальних рівнянь, що враховують як електромеханічну, так і теплову динаміку.

Тепловий стан обмоток електродвигуна може бути описаний рівнянням теплового балансу (6):

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = P_{loss} - \frac{T - T_{env}}{R_{th}} \quad (6)$$

де C_{th} – теплова ємність обмоток; T – температура двигуна; T_{env} – температура навколишнього середовища; R_{th} – тепловий опір; P_{loss} – втрати потужності в обмотках. Використання цієї моделі дозволяє оцінювати ризик теплового перевантаження двигуна при роботі в умовах тривалого просідання напруги.

У сучасних дослідженнях електротехнічних систем широко застосовується простір станів, який дозволяє компактно описати багатовимірні динамічні процеси. Узагальнена стохастична модель має вигляд: (7):

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + v(t) \end{aligned} \quad (7)$$

де $x(t)$ – вектор стану системи, який може включати струми, швидкість обертання, температури та інші внутрішні параметри; $u(t)$ – вектор керуючих впливів (напруга, частота, сигнали керування); $y(t)$ – вектор вимірюваних вихідних змінних. Матриці A, B, C, D описують динаміку системи та взаємозв'язки між змінними. Додаткові складові $w(t)$ та $v(t)$ відображають стохастичні збурення та шуми вимірювання.

Фізичний зміст цих складових є надзвичайно важливим. Функція $w(t)$ моделює невизначені зовнішні впливи, такі як коливання напруги мережі, зміни навантаження або механічні вібрації. Водночас $v(t)$ описує похибки вимірювальних систем, включаючи шум датчиків, похибки аналого-цифрових перетворювачів

(АЦП) та інші джерела неточності. У реальних умовах ці фактори суттєво впливають на якість керування та точність діагностики.

Для аналізу стійкості системи в просторі станів використовувалася характеристична функція матриці стану: $\det(\lambda I - A) = 0$, де λ – власні значення системи; I – одинична матриця; A – матриця стану електропривода; $\det$ – оператор визначника. Отримані власні значення використовуються для оцінювання стійкості системи. Якщо всі значення λ мають від’ємну дійсну частину, система є стійкою; якщо хоча б одне значення має додатну дійсну частину, система переходить у нестійкий режим роботи. Аналіз показав, що при зниженні напруги нижче 300 В частина власних значень наближається до уявної осі, що свідчить про погіршення запасу стійкості електропривода.

Саме тому застосування лабораторних установок дає змогу не лише врахувати ці фактори, але й відтворити їх у контрольованому середовищі. За допомогою програмованих джерел живлення можна моделювати різні режими електромережі, включаючи провали напруги та гармонійні спотворення, а механічні навантаження дозволяють імітувати зміну технологічних умов. Це створює можливість проведення серії експериментів, у яких досліджується реакція системи на задані збурення.

Важливо підкреслити, що сучасні підходи поєднують лабораторні дослідження з методами системного аналізу та машинного навчання. На основі експериментальних даних можуть будуватися моделі прогнозування, які здатні виявляти передаварійні режими та відхилення параметрів ще до їх критичного прояву. Це особливо актуально для систем власних потреб енергоблоків АЕС, де навіть короточасна відмова може призвести до серйозних наслідків. Таким чином, лабораторне обладнання виступає ключовим інструментом, що забезпечує зв’язок між теоретичними моделями та реальними об’єктами. Воно дозволяє уточнювати параметри моделей, досліджувати взаємодію фізичних процесів, перевіряти стійкість систем та відтворювати складні режими роботи. У поєднанні з сучасними методами аналізу це формує основу для створення високоточних цифрових моделей та інтелектуальних систем керування, що є особливо важливим для енергетичних об’єктів підвищеної відповідальності, таких як енергоблоки АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

У межах вирішення другого завдання дослідження було проведено комплексне експериментальне моделювання режимів роботи системи автоматизованого електропривода насосного агрегату на базі лабораторного обладнання Festo (рис. 2).

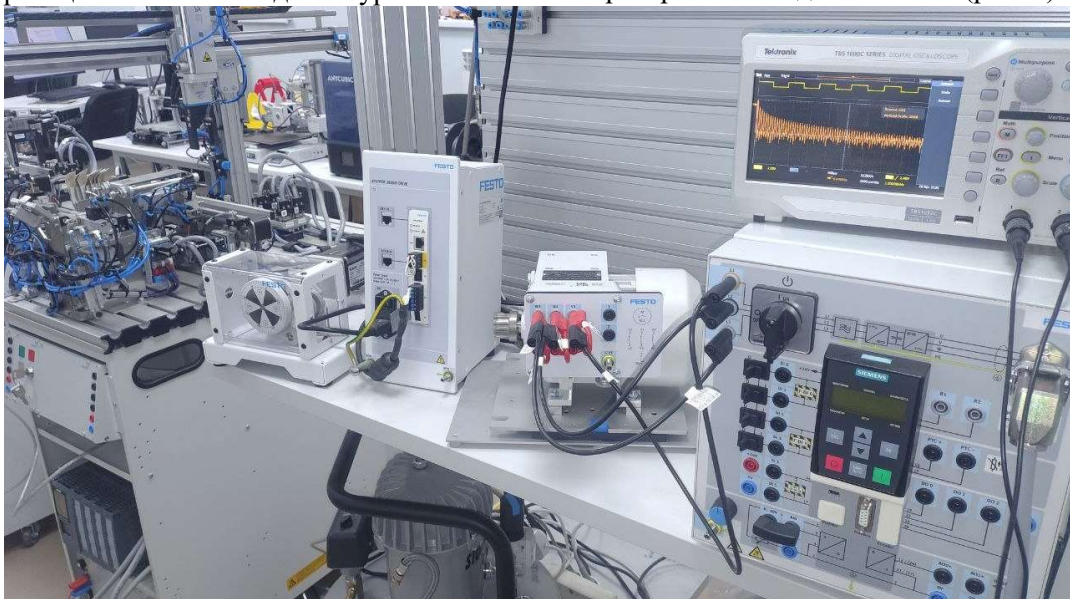


Рис. 2 – Загальний вигляд експериментального обладнання
Fig. 2 – General view of the experimental equipment

Основною метою даного етапу стало встановлення кількісних залежностей між параметрами електроживлення та динамічними характеристиками автоматизованого електропривода, характерними для систем власних потреб енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000.

Експериментальна частина дослідження була реалізована на кафедрі електротехніки та електроенергетики Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, у лабораторії електротехніки та автоматизованого електроприводу, з використанням модульного обладнання Festo, отриманого у межах реалізації Проєкту «Удосконалення вищої освіти в Україні заради результатів» (UIHERP), що фінансується Світовим банком.

До складу обладнання входили

асинхронний електродвигун, трифазне джерело живлення, модуль змінного навантаження, система вимірювання електричних величин та цифровий блок збору даних у режимі реального часу. Така архітектура дозволила відтворити режими, максимально наближені до реальних умов функціонування насосного обладнання систем охолодження, циркуляції теплоносія та аварійного тепловідведення.

У ході дослідження моделювалися як штатні режими роботи, так і режими часткового просідання напруги, що є типовими для перехідних або передаварійних процесів у системах електропостачання енергоблоку АЕС. Зміна напруги живлення здійснювалася в діапазоні від 260 до 380 В.

Результати експериментальних вимірювань наведено в табл. 1.

Таблиця 1
Експериментальні характеристики автоматизованого електропривода
Table 1

Experimental characteristics of the automated electric drive

№ досліджу	Напруга, В	Швидкість, об/хв	Струм, А	Потужність, кВт	Час виходу на режим, с
1	380	1485	5.2	2.80	2.1
2	360	1458	5.4	2.73	2.2
3	340	1415	5.8	2.60	2.4
4	320	1360	6.3	2.42	2.7
5	300	1298	6.9	2.21	3.0
6	280	1215	7.5	1.98	3.5
7	260	1120	8.1	1.72	4.1

Аналіз експериментальних результатів показав, що зі зменшенням напруги живлення спостерігається стале зниження швидкості обертання ротора при одночасному зростанні струму статора. Це пояснюється зменшенням електромагнітного моменту двигуна, що особливо критично для насосних агрегатів, які працюють у системах безпеки АЕС.

Для підтвердження достовірності

отриманих результатів було проведено статистичну обробку експериментальних даних. Кожне вимірювання виконувалося тричі, після чого визначалися середні значення швидкості обертання, стандартне відхилення та відносна похибка. Це дозволило оцінити відтворюваність експерименту та встановити ступінь узгодженості між окремими серіями вимірювань. Результати статистичної обробки наведено в табл. 2.

Таблиця 2
Результати статистичної обробки експериментальних даних
Table 2

Results of statistical processing of experimental data

Напруга, В	Середня швидкість, об/хв	Стандартне відхилення, об/хв	Відносна похибка, %
380	1485	12	0.8
340	1415	16	1.1
300	1298	21	1.6
260	1120	24	2.1

Для кожної експериментальної точки проводилося три повторних вимірювання. Статистична обробка показала, що стандартне відхилення не перевищує 24 об/хв, а відносна похибка вимірювання залишається меншою за 2.1 %. Це свідчить про високу відтворюваність результатів та достатню точність експериментальної установки.

Отримана залежність має майже лінійний характер у досліджуваному діапазоні. За методом найменших квадратів отримано апроксимуюче рівняння $n(U) = 3.04U + 331$. Коефіцієнт детермінації для цієї моделі становить $R^2 = 0.987$, що свідчить про високу узгодженість між експериментальними даними та аналітичним описом.

Додатково виконано порівняння експериментальної характеристики з теоретичною залежністю, отриманою на основі математичної моделі. Максимальна розбіжність між розрахунковими та експериментальними значеннями швидкості не перевищувала 5.3 %, що підтверджує адекватність моделі та можливість її використання для прогнозування поведінки електропривода в аварійних режимах.

Для візуального аналізу була побудована статична характеристика залежності швидкості обертання від

напруги живлення (рис. 3) та графік зміни активної потужності, який представлено на рис. 4.

Побудовані графіки демонструють майже лінійне зменшення споживаної потужності зі зниженням напруги живлення, однак при цьому спостерігається зростання струму, що є характерною ознакою погіршення режиму роботи асинхронного автоматизованого електропривода.

Особливо важливим результатом є встановлення критичної області напруг нижче 300 В, у якій починається різке зростання струмового навантаження. Для систем власних потреб АЕС це може свідчити про ризик теплового перевантаження обмоток двигуна та зниження надійності насосного обладнання.

Аналіз чутливості моделі показав, що найбільший вплив на динамічні характеристики системи мають напруга живлення та момент інерції ротора. Зокрема, зменшення напруги на 20 % призводить до зростання часу виходу на режим на 43 %, тоді як збільшення моменту інерції на 20 % спричиняє збільшення часу розгону на 14 %. Це підтверджує доцільність врахування інерційних властивостей насосних агрегатів при моделюванні систем власних потреб енергоблоків АЕС.

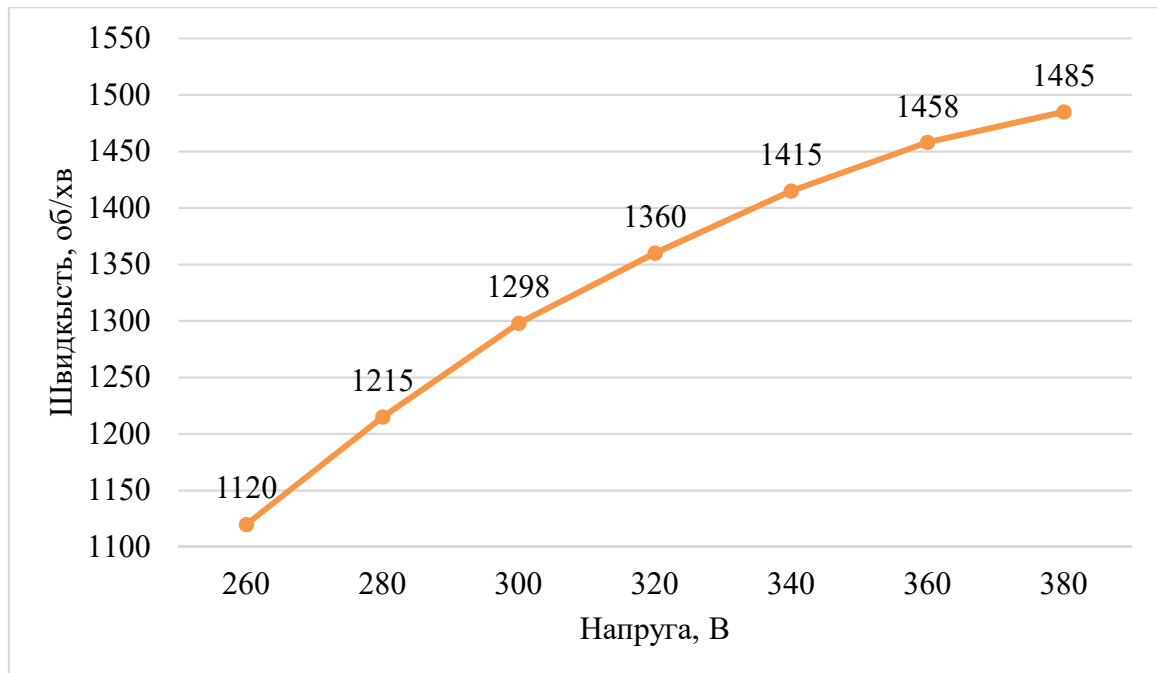


Рис. 3 – Статична характеристика залежності швидкості обертання від напруги живлення
Fig. 3 – Static characteristic of the dependence of rotation speed on supply voltage

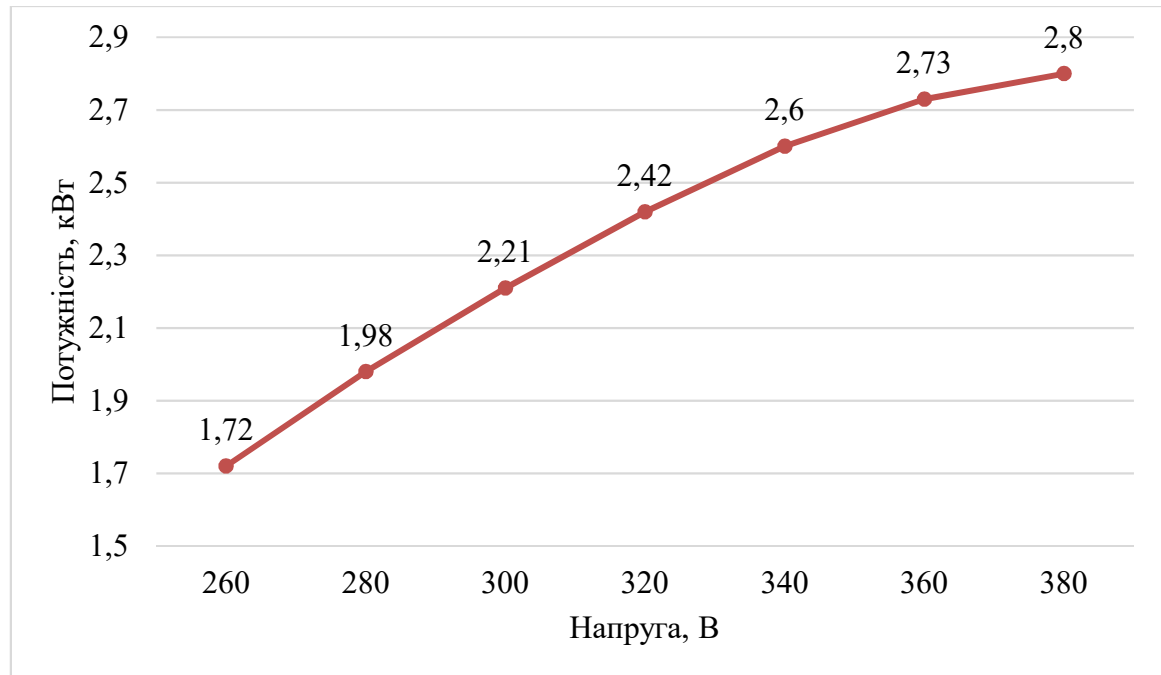


Рис. 4 – Графік зміни активної потужності залежно від напруги живлення

Fig. 4 – Graph of active power change depending on supply voltage

Окремо було досліджено аварійний режим повної втрати зовнішнього електроживлення. Експериментально встановлено, що час інерційного вибігу ротора до зниження швидкості до 10 % від номінальної становить 4,8 с, що є достатнім часовим резервом для підключення резервного електроживлення. Отриманий часовий резерв є достатнім для реалізації сценарію автоматичного підключення резервного джерела живлення, зокрема дизель-генераторної установки. Для енергоблоків типу ВВЕР-1000 типовий час запуску резервного електроживлення становить 2–4 с, тому інерційний вибіг ротора протягом 4,8 с забезпечує збереження працездатності насосного обладнання без критичного зниження продуктивності. Отримані експериментальні залежності та параметри математичної моделі можуть бути використані як основа для побудови цифрового двійника електротехнічної

системи власних потреб енергоблоку АЕС. Експериментальні дані, отримані на лабораторному стенді Festo, дозволяють виконувати калібрування параметрів цифрової моделі, уточнювати характеристики електроприводів та прогнозувати поведінку системи в умовах аварійних режимів.

Особливу перспективу становить інтеграція цифрового двійника із системами машинного навчання, що дозволить виявляти передаварійні режими за зміною струму, швидкості обертання та часу виходу на режим. Це створює основу для розробки інтелектуальних систем діагностики та прогнозування відмов електротехнічних систем енергоблоків АЕС.

Таким чином, проведене експериментальне моделювання підтвердило адекватність розробленої моделі та доцільність використання лабораторного обладнання Festo для дослідження режимів роботи електротехнічних систем енергоблоків АЕС.

Висновки

Проведене дослідження показало, що лабораторні стенди компанії Festo дозволяють відтворювати ключові режими роботи електротехнічних систем енергоблоків АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000, включаючи штатні, перехідні та аварійні режими. Це забезпечує можливість експеримент-

ального аналізу впливу просідання напруги, перевантаження, втрати зовнішнього живлення та інших критичних факторів на роботу систем автоматизованих електроприводів насосного обладнання та систем власних потреб.

Розроблена математична модель асинхронного автоматизованого електропривода, що базується на рівняннях електромеханічної рівноваги та залежностях потужності від швидкості обертання, показала високу відповідність результатам експериментальних досліджень. Верифікація моделей підтвердила їхню придатність для прогнозування динамічних процесів у системах власних потреб, враховуючи нелінійність навантаження та інерційні властивості механічної частини.

Використання лабораторного комплексу дозволяє моделювати аварійні ситуації без ризику для реального обладнання, що сприяє підвищенню безпеки та стійкості функціонування систем енергоблоків АЕС з реакторами типу ВВЕР-1000. Це є особливо актуальним для підготовки персоналу та проведення наукових досліджень з імітацією аварійних сценаріїв у енергетичних системах.

Отримані результати можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки інженерних кадрів, у наукових дослідженнях для оптимізації електротехнічних систем та для розробки цифрових двійників енергоблоків АЕС. Експериментально-аналітичний підхід забезпечує інтеграцію фізичних процесів, математичного моделювання та вимірювань у єдину платформу для дослідження динаміки автоматизованих електроприводів.

Отримані дані відкривають перспективи для подальшого розвитку методів моделювання аварійних режимів, удосконалення алгоритмів керування системами автоматизованого електроприводу та створення високоточних цифрових моделей енергоблоків. Це дозволяє підвищити ефективність експлуатації та забезпечити стабільність роботи систем власних потреб АЕС у реальних умовах.

Фінансування

Лабораторія автоматизації виробничих процесів та Лабораторія електротехніки, автоматизованого електроприводу (Festo) отримані Харківським національним університетом імені В.Н. Каразіна в межах реалізації Проєкту «Удосконалення вищої освіти в Україні заради результатів» (UIHERP), який фінансується Світовим банком.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Mathematical modeling of driving forces of an electric vehicle for sustainable operation / Agrawal A., Singh R., Kumar N., Singh V. P., Alotaibi M. A., Malik H., Hossaini M. A. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 95278–95294. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3309728>
2. Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles / Halko S., Halko K., Suprun O., Qawaqzeh M., Miroshnyk O. *IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. October. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397>
3. An increase in the energy efficiency of a new design of pumps for nuclear power plants / Pavlenko I., Ciszak O., Kondus V., Ratushnyi O., Ivchenko O., Kolisnichenko E., Ivanov V. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 6. P. 2929. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
4. Reliability analysis of complex electromechanical systems: State of the art, challenges, and prospects / Wang R., Xu J., Zhang W., Gao J., Li Y., Chen F. *Quality and Reliability Engineering International*. 2022. Vol. 38, No. 7. P. 3935–3969. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3175>
5. Comprehensive power quality performance assessment for electrical system of a nuclear research reactor / Elsothly A. M., Soliman A. M. A., Adail A. S., Eisa A. A., Othman E. S. A. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, No. 1. P. 9915. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36692-2>
6. Математична модель синхронного двигуна в реальних координатних осях / Качура О. В., Количев С. В., С'янов О. М., Зальоткін В. В., Десна Д. О. *Збірник наукових праць*

Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). 2025. Т. 2, №. 47. С. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.47.2025.12>

7. Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Войтенко С. М. Моделювання інформаційно-керуючої системи АЕС на базі комплектів FESTO та контролера Siemens S7-1516 із використанням FLUIDSIM. *Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних і телекомунікаційних систем* : тези 14-ї міжнар. наук.-техн. конф. (IPST-2025). Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 225–226. URL : <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f205dd4a-f83f-482a-9ae5-1f67581ffada/content> (дата звернення 13.05.2026)

8. Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large scale hardware demonstration / Chakraborty S., Park J., Saraswat G., Meyers T., Wang J., Tiwari S., Salapaka M. V. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 114509–114526. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325198>

9. Application of hybrid renewable energy for supplying the emergency power supply system in case of station blackout in nuclear power plant / Kotb S. A., Zaky M. M., Elbaset A. A., Morad M. *Annals of Nuclear Energy*. 2022. Vol. 175. Pp. 109222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109222>

10. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant / Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrysov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, No. 9(136). P. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>

11. Розробка інтегрованої моделі цифрового двійника для ефективної експлуатації енергоблоків АЕС / Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д., Великогорський О. В. *Технічна інженерія*. 2025. № 2(96). С. 58–67. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-58-67](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-58-67)

12. Оцінювання якості та прогнозування ризиків процесів системи управління підприємств кваліметричними методами / Рудик Ю. І., Тріщ Г. М., Катрич О. О., Хімичева А. І., Малахов І. М., Тимофеев О. П. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2024. Вип. 33. С. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-92-101>

13. Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives / Alvarez-Alvarado M. S., Donaldson D. L., Recalde A. A., Noriega H. H., Khan Z. A., Velasquez W., Rodriguez-Gallegos C. D. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. Pp. 51922–51950. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>

14. Multi-parameter optimization of NPP simulation models using enhanced particle swarm method / Li Z., Wang H., Fei L., Peng M., Xian Z., Zhou G. *Progress in Nuclear Energy*. 2025. Vol. 184. Pp. 105671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105671>

15. From mathematical modeling and simulation to digital twins: Bridging theory and digital realities in industry and emerging technologies / Kantaros A., Ganetsos T., Pallis E., Papoutsidakis M. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 16. P. 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15169213>

Отримано: 10.04.2026 / Переглянуто: 18.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹BROVKO K., Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: brovkokonstantin@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>

¹BUDANOV P., Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4519-3879>

¹VOITENKO S.,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: v.natasha.d@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>

¹VYNOKUROVA N.,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: voitenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8829-2647>

¹VELYKOHORSKYI O.

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine*

FESTO LABORATORY EQUIPMENT AS A TOOL FOR EXPERIMENTAL MODELING OF ELECTRICAL SYSTEMS OF NPP POWER UNITS

The article explores the possibilities of using Festo laboratory equipment for experimental modeling and analysis of electrical systems of nuclear power plants with VVER-1000 reactors. The relevance of the work is due to the need to increase the reliability and stability of the operation of the power units' own needs systems, which ensure the continuous operation of automated electric drive systems of pumping equipment, heat removal systems, core cooling and safety systems. Power supply disruptions or deviations in electrical energy parameters can lead to a decrease in the efficiency of the functioning of technological equipment and create potential threats to the safe operation of the power unit.

The paper proposes an experimental and analytical approach to the study of electromechanical processes in automated electric drive systems, taking into account dynamic characteristics, load nonlinearity and the influence of transient and emergency modes. A mathematical model of an asynchronous automated electric drive of a pumping unit has been developed, which is based on the equations of electromechanical equilibrium, the dependence of power consumption on the speed of rotation, as well as the analysis of active power in alternating current circuits. Particular attention is paid to taking into account the inertial properties of the mechanical system and the influence of changes in the supply voltage on the electromagnetic moment and the stability of the drive.

Experimental studies were conducted on the Festo laboratory stand, which allowed to simulate normal, transient and emergency operating modes, in particular voltage sag, overload and loss of external power supply. During the experiment, the dependences between the supply voltage, the speed of rotation of the electric motor and the consumed power were obtained, which confirm the adequacy of the constructed theoretical models and their suitability for describing real processes in systems of own needs. An assessment of measurement errors was performed, which allowed to establish their permissible level and confirm the reliability of the results obtained.

It is shown that the use of Festo laboratory complexes allows to effectively reproduce critical operating modes of electrical systems typical of VVER-1000 type power units, including power failure scenarios and dynamic transient processes. This is important for increasing the level of safety, reliability and efficiency of operation of nuclear power plants. The results obtained can be used in the educational process of training engineering personnel, in conducting scientific research, as well as for simulation modeling of emergency situations in energy systems.

KEYWORDS: electrical systems; nuclear power plant; automated electric drive; emergency modes; Festo laboratory equipment.

In cites: Brovko K., Budanov P., Voitenko S., Vynokurova N., Velykohorskyi O. (2026). Festo Laboratory Equipment as a Tool for Experimental Modeling of Electrical Systems of NPP Power Units. Engineering, (37), 32-48. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-03> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Funding

The Laboratory of Automation of Production Processes and the Laboratory of Electrical Engineering, Automated Electric Drive (Festo) were received by V.N. Karazin Kharkiv National University within the framework of the implementation of the Project "Improving Higher Education in Ukraine for Results" (IHEUR), which is financed by the World Bank.

References:

1. Agrawal, A, Singh, R, Kumar, N, Singh, VP, Alotaibi, MA, Malik, H & Hossaini, MA 2023, 'Mathematical modeling of driving forces of an electric vehicle for sustainable operation', *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 95278–95294. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3309728>
2. Halko, S, Halko, K, Suprun, O, Qawaqzeh, M & Miroshnyk, O 2022, 'Mathematical modelling of cogeneration photoelectric module parameters for hybrid solar charging power stations of electric vehicles', *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, October 2022, pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916397> (in Ukraine)
3. Pavlenko, I, Ciszak, O, Kondus, V, Ratushnyi, O, Ivchenko, O, Kolisnichenko, E & Ivanov, V 2023, 'An increase in the energy efficiency of a new design of pumps for nuclear power plants', *Energies*, Vol. 16, No. 6, pp. 2929. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062929>
4. Wang, R, Xu, J, Zhang, W, Gao, J, Li, Y & Chen, F 2022, 'Reliability analysis of complex electromechanical systems: State of the art, challenges, and prospects', *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 38, No. 7, pp. 3935–3969. DOI: <https://doi.org/10.1002/qre.3175>
5. Elsotho, AM, Soliman, AMA, Adail, AS, Eisa, AA & Othman, ESA 2023, 'Comprehensive power quality performance assessment for electrical system of a nuclear research reactor', *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, pp. 9915. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36692-2>
6. Kachura, OV, Kolichev, SV, Sianov, OM, Zalotkin, VV & Desna, DO 2025, 'Matematychna model synchroonnoho dvygyna v realnykh koordynatnykh osiakh' [Mathematical model of a synchronous motor in real coordinate axes]. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu (tekhnichni nauky)*, Vol. 2, No. 47, pp. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.47.2025.12> (in Ukraine)
7. Brovko, KYu, Budanov, PF & Voytenko, SM 2025, 'Modeliuvannia informatsiino-keruiuchoi systemy AES na bazi komplektiv FESTO ta kontrolera Siemens S7-1516 iz vykorystanniam FLUIDSIM' [Modeling of the information-control system of a NPP using FESTO kits and Siemens S7-1516 controller with FLUIDSIM], *Informatsiini problemy teorii akustychnykh, radioelektronnykh i telekomunikatsiynykh system (IPST-2025)*, NTU "KhPI", Kharkiv, Pp. 225–226.
8. Chakraborty, S, Park, J, Saraswat, G, Meyers, T, Wang, J, Tiwari, S & Salapaka, MV 2023, 'Emergency power supply system for critical infrastructures: Design and large scale hardware demonstration', *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 114509–114526. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325198>
9. Kotb, SA, Zaky, MM, Elbaset, AA & Morad, M 2022, 'Application of hybrid renewable energy for supplying the emergency power supply system in case of station blackout in nuclear power plant', *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 175, pp. 109222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109222>
10. Budanov, P, Brovko, K, Melnykov, V, Yakymchuk, M, Kononov, V, Kyrsov, I, Nosyk, A, Karpenko, O, Kalnoy, S & Khomiak, E 2025, 'Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, No. 9(136), pp. 39–49. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712> (in Ukraine)
11. Brovko, KYu, Budanov, PF, Vinokurova, ND & Velykohorskyi, OV 2025, 'Rozrobka intehrovanoi modeli tsyfrovoho dviinyka dlia efektyvnoi ekspluatatsii enerhoblokiv AES'

[Development of an integrated digital-twin model for efficient operation of NPP power units], *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2(96), pp. 58–67. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-58-67](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-58-67) (in Ukraine)

12. Rudyk, YuI, Trishch, HM, Katrych, OO, Khimicheva, AI, Malakhov, IM, & Tymofieiev, OP 2024, ‘Otsiniuvannia yakosti ta prohnozuvannia ryzykiv protsesiv systemy upravlinnia pidpriemstv kvalimetrychnymy metodamy’ [Assessment of quality and forecasting of risks of enterprise management system processes by qualimetric methods], *Engineering*, Issue 33, pp. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-92-101> (in Ukraine)

13. Alvarez-Alvarado, MS, Donaldson, DL, Recalde, AA, Noriega, HH, Khan, ZA, Velasquez, W & Rodriguez-Gallegos, CD 2022, ‘Power system reliability and maintenance evolution: A critical review and future perspectives’, *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 51922–51950. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3172697>

14. Li, Z, Wang, H, Fei, L, Peng, M, Xian, Z & Zhou, G 2025, ‘Multi-parameter optimization of NPP simulation models using enhanced particle swarm method’, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 184, pp. 105671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2025.105671>

15. Kantaros, A, Ganetsos, T, Pallis, E & Papoutsidakis, M 2025, ‘From mathematical modeling and simulation to digital twins: Bridging theory and digital realities in industry and emerging technologies’, *Applied Sciences*, Vol. 15, No. 16, pp. 9213. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15169213>

Submission received: 04.10.2026/Revised: 05.18.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04>

УДК 621.315.592.1

КИРИСОВ І. Г., доктор філософії,

старший викладач кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: igorkirisov@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>

МЕЛЬНИКОВ В. Є., кандидат технічних наук,

доцент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

БУДАНОВ М. П., доктор філософії,

доцент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: budanov@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0562>

ПОНОМАРЕНКО О. М.,

асистент кафедри електротехніки і електроенергетики

e-mail: olena.ponomarenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-1777>

¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,

Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ТА ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛІ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних моделей сонячних елементів, які описують їх електрофізичні характеристики та внутрішні процеси перетворення сонячної енергії в електричну. Узагальнено підходи до математичного моделювання фотоелектричних перетворювачів із урахуванням їх структурно-матеріальних особливостей та фізичних механізмів генерації й рекомбінації носіїв заряду.

Досліджено залежності основних фотоелектричних параметрів сонячних елементів від впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, зокрема температури, інтенсивності та спектрального складу сонячного випромінювання. Встановлено, що підвищення температури призводить до деградації ключових експлуатаційних характеристик, зокрема коефіцієнта корисної дії, напруги холостого ходу, коефіцієнта заповнення та параметрів вольт-амперної характеристики. Обґрунтовано, що зазначені зміни зумовлені варіаціями ширини забороненої зони, зростанням рівня рекомбінаційних процесів і зниженням рухливості носіїв заряду в напівпровідникових матеріалах.

Розроблено удосконалену методику розрахунку основних електрофізичних параметрів сонячних елементів, зокрема струму короткого замикання та напруги холостого ходу, яка базується на врахуванні багаточислової структури матеріалів, їх фізико-хімічних властивостей та умов експлуатації. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність визначення вихідної потужності, коефіцієнта корисної дії та стабільності вольт-амперних характеристик у реальних умовах функціонування.

Особливу увагу приділено аналізу впливу змін освітленості, включаючи варіації інтенсивності та спектрального складу сонячного випромінювання, що суттєво впливають на генерацію фотоструму та формування вихідних електричних параметрів. Показано, що динамічні зміни умов освітлення впродовж доби або в умовах нестабільного випромінювання спричиняють нелінійні зміни характеристик сонячних елементів, що необхідно враховувати при їх моделюванні та експлуатації.

Обґрунтовано необхідність подальшого вдосконалення існуючих моделей сонячних елементів шляхом інтеграції температурних, спектральних та структурних факторів, що забезпечить підвищення достовірності розрахунків і ефективності функціонування фотоелектричних систем в умовах реальної експлуатації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: сонячний елемент, модель сонячного елемента, фотоелектричне перетворення, математичне моделювання, електрофізичні параметри, коефіцієнт корисної дії, вольт-амперна характеристика, інформаційно-вимірювальні системи, кваліметрія, фотоелектричний модуль.



Як цитувати: Кирисов І. Г., Мельников В. Є., Буданов М. П., Пономаренко О. М. Дослідження кількісних та якісних параметрів моделі сонячного елемента. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 49-63. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04>

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток енергетики дедалі більше орієнтується на використання відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячна енергія займає провідне місце. Це зумовлено необхідністю зменшення залежності від викопних палив, зниженням негативного впливу на довкілля та забезпеченням енергетичної безпеки. У цьому контексті сонячні елементи (СЕ) виступають ключовими складовими фотоелектричних систем, а їх ефективність значною мірою визначається точністю математичних моделей, що описують їх роботу. Моделювання СЕ дозволяє досліджувати їх поведінку за різних умов експлуатації без необхідності проведення дорогих експериментальних випробувань. Особливу увагу приділяють визначенню кількісних параметрів СЕ, таких як напруга холостого ходу, струм

короткого замикання, коефіцієнт заповнення та максимальна вихідна потужність, а також якісних характеристик, що відображають стабільність, чутливість до температури та рівня освітленості. Комплексний аналіз цих параметрів є важливим для оптимізації конструкції СЕ і підвищення ефективності фотоелектричних систем.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю вдосконалення моделей СЕ, які адекватно відображають фізичні процеси, що відбуваються в напівпровідникових структурах, та забезпечували високу точність прогнозування їх характеристик. Аналіз кількісних і якісних параметрів моделі СЕ дозволяє визначити ступінь її відповідності реальним умовам роботи та встановити фактори, що впливають на ефективність перетворення сонячної енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [1] проведено моделювання темнових та світлових ВАХ. Встановлені оптимальні конструктивні параметри СЕ, що забезпечують максимальний коефіцієнт корисної дії (ККД) фотоелектричного модуля.

В роботі [2] проведено моделювання темнових та світлових ВАХ, а також спектральних розподілів квантової ефективності плівкових СЕ на основі ідеальних. У роботі [1] наведені формули та розвинений алгоритм для розрахунку основних параметрів однодіодної схеми заміщення, який дає змогу визначити їх залежність від напруги на р-п-переході.

В роботі [3] розроблено геометричну модель структури сприймаючої поверхні фотоелектричного модуля, яка описує та враховує геометричні зміни структури напівпровідникового шару за наявності пошкоджуючих дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин. Отримані в роботі аналітичні вирази для вдосконаленої моделі встановлюють зв'язок між вихідними параметрами фотоелектричного модуля та визначають

ступінь заповнення вольт-амперної характеристики для вихідної потужності та ККД.

В роботі [4] проведено моделювання структури фотоелектричного модуля (ФЕП) для створення математичного алгоритму розрахунку ФЕП із визначеними характеристиками. Проведена оптимізація математичного апарату моделі універсальної структури ФЕП.

В роботі [5] була розроблена математичну модель залежності потужності фотоелектричного модуля від кута повороту відносно сонця. Розроблена модель враховує температуру навколишнього середовища, температуру, що отримав фотоелектричний модуль у процесі функціонування, вплив вітру на температуру модуля, а також вплив часу доби, дня року, кутів нахилу фотоелектричного модуля відносно сонця, можливостей світловідбивання оточуючого середовища.

В роботі [6] розглянуто методику знаходження параметрів еквівалентних схем заміщення фотоелектричного модуля за допомогою даних, які надаються виробниками. Розроблена методика моделювання

вольт-амперних характеристик застосована для одно- та двохдiodної схем заміщення фотоелектричного модуля. Показано, що запропонована методика забезпечує найкращу точність апроксимації.

В роботах [7-9] розглянуто

моделювання роботи фотоелектричного модуля з використанням середовища MATLAB/Simulink, зроблено порівняння змодельованих характеристик фотоелектричних модулів, з даними, наведеними у технічній документації.

Мета та завдання дослідження

Метою статті є моделювання кількісних та якісних параметрів фотоелектричного модуля для стабілізації

та точності вольт-амперних характеристик за допомогою моделей кваліметрії.

Виклад основного матеріалу

Моделювання параметрів СЕ є ключовим елементом для підвищення його ефективності, надійності та економічної доцільності, що, сприяє широкому практичному застосуванню фотоелектричних модулів.

Особливостями моделювання кількісних та якісних параметрів СЕ є:

- оптимізація проектування, що допомагає удосконалити їх конструкцію та матеріали для досягнення максимальної продуктивності;
- покращення ефективності, шляхом аналізу параметрів, таких як: струму короткого замикання, напруги холостого ходу та внутрішнього опору;
- ідентифікація дефектів, у виробничому процесі та відхилення від розрахункових значень, що може сигналізувати про наявність забруднень;
- прогнозування продуктивності, СЕ під впливом різних зовнішніх факторів (температура, рівень освітлення), що є важливим для їхньої експлуатації в реальних умовах;
- порівняльний аналіз різних типів СЕ, дозволяючи досліджувати їх переваги та недоліки та вибирати ефективні рішення для конкретних застосувань;
- адаптація до нових матеріалів;
- зниження виробничих та експлуатаційних

ційних витрат, що робить сонячну енергетику доступною та конкурентоспроможною;

- розробки нових технологій, дозволяючи швидше та ефективніше проводити експерименти та аналізувати їх результати;

Особливостями побудови вольт-амперних характеристик (ВАХ) СЕ є (рис. 1):

- точне передбачення параметрів СЕ при різних умовах експлуатації, що критично важливо для оптимізації конструкції та матеріалів, а також безпосередньо впливає на вихідну потужність та ефективність;
- виявлення дефектів в матеріалах та технології виробництва, відхилення від розрахункових значень, що може сигналізувати про проблеми, такі як недостатня фотопровідність або неефективне поглинання світла;
- врахування впливу зовнішніх факторів, таких як температура, рівень освітлення та кут падіння сонячних променів, а також прогнозування, роботи СЕ в реальних умовах, що особливо важливо для проектування сонячних електростанцій;
- проведення порівняльного аналізу різних типів СЕ, що допомагає визначити ефективні рішення для конкретних умов.

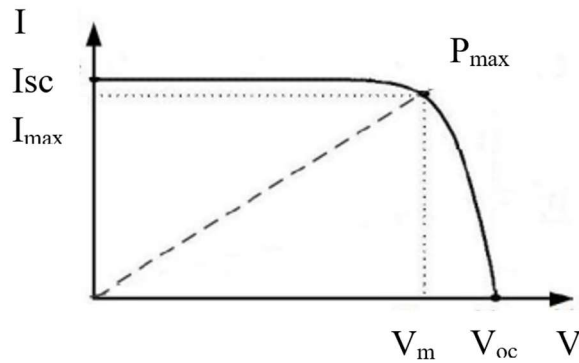


Рис. 1 – Вольт-амперна характеристика сонячного елемента
Fig. 1 – Volt-ampere characteristic of a solar cell

Використання моделей ВАХ у системі управління якістю, допомагає встановити стандарти та проводити регулярні перевірки, що сприяє підвищенню надійності та довговічності СЕ.

У роботі було розглянуто зв'язок моделі СЕ з його ключовими електричними характеристиками. Модель СЕ є критично важливим інструментом для дослідження та оптимізації електричних характеристик, таких як: струм короткого замикання (I_{sc}), напруга холостого ходу (U_{oc}), внутрішній опір ($R_{вн}$), фотострум (I_{ϕ}), вихідна потужність ($P_{вих}$), і коефіцієнт корисної дії (ККД).

Струм короткого замикання є максимальним струмом, який СЕ може видати за умови відсутності навантаження, тобто при нульовій напрузі. Високий струм короткого замикання свідчить про хороші оптичні властивості матеріалу СЕ та ефективне поглинання світла [14-15]. Струм короткого замикання є індикатором здатності СЕ генерувати електроенергію і безпосередньо пов'язаний із фотострумом. Модель СЕ, дозволяє передбачити струм короткого замикання, на основі фотоструму, що створюється при освітленні. У математичних моделях, таких як модель однотипного діода, струм короткого замикання обчислюється як функція інтенсивності сонячного випромінювання та температури.

При порівнянні теоретичних значень струму короткого замикання з експериментально отриманими даними, можна виявити невідповідності, які вказують на дефекти в матеріалі СЕ. Якщо фактичний струм короткого замикання, нижчий за очікуваний, це може свідчити про наявність забруднень на поверхні напівпровідника,

що підтверджується лабораторними тестами.

При порівнянні однотипних СЕ критичним параметром є дифузійна довжина і пасивація поверхні. У СЕ, з рівномірною генерацією, струм короткого замикання можна записати, згідно виразу (1):

$$I_{sc} = q \cdot G (L_n + L_p), \quad (1)$$

де I_{sc} - струм короткого замикання; G - швидкість генерації; q - заряд електрона; L_n і L_p - дифузійна довжина електронів і дірок відповідно.

Хоча вираз (1) використовує деякі припущення, він показує, що струм короткого замикання сильно залежить від швидкості генерації та дифузійної довжини.

Струм короткого замикання визначається кількістю фотонів, що поглинаються напівпровідниковим матеріалом СЕ. Коли фотон з достатньою енергією взаємодіє з атомами матеріалу, може вибити електрон з його орбіти, створюючи пару «електрон-дірка». Ці вільні електрони і дірки починають рухатися під впливом внутрішнього електричного поля, створеного р - n переходом, що у результаті призводить до виникнення струму.

Для СЕ, що працюють на кремнії, струм короткого замикання значною мірою залежить від:

- інтенсивності сонячного випромінювання;
- спектра сонячного випромінювання;
- температури;

Для передбачення струму короткого замикання використовують різні матема-

тичні моделі, серед яких найбільш поширені [3,10]:

- модель однотипного діода, ця модель заснована на рівнянні діода і дозволяє обчислювати струм короткого замикання, як функцію від інтенсивності світла та температурних умов;

- моделі на основі чисельних симуляцій, що використовують чисельні методи та дозволяють враховувати геометрію сонячного елемента.

Порівняння розрахункових значень струму короткого замикання з експериментально отриманими даними, дозволяє оцінити точність моделей, та виявити потенційні проблеми у виробничому процесі. Якщо фактичний струм короткого замикання виявляється значно нижчим за очікуваний, це може вказувати на: забруднення на поверхні (пил, бруд або органічні забруднення); неправильна технологія виготовлення (дефекти кристалічної структури або неякісні матеріали); неефективна подача світла (неправильний кут установки фотоелектричного модуля), що може призвести до зниження інтенсивності сонячного випромінювання на поверхні СЕ.

Основними чинниками, які впливають на значення струму короткого замикання, є: температурні коливання; використання антивідбивних покриттів, які можуть значно підвищити струм короткого замикання за рахунок зменшення відбивної здатності СЕ та збільшення поглинання світла; структура напівпровідникового шару.

Моделі, що описують струм короткого замикання, можуть бути корисними для оцінки довгострокової надійності СЕ. Прогнозування змін струму короткого замикання в результаті деградації матеріалу з часом, дозволяє розробити надійні фотоелектричні модулі, що критично важливо для забезпечення їх довговічності та високої продуктивності.

Струм короткого замикання є важливим параметром, який впливає на загальну ефективність СЕ. Модель СЕ дозволяє, як передбачити струм короткого замикання, так і виявити причини можливих відхилень від очікуваних значень. Це робить модель важливим інструментом для оптимізації та підвищення ефективності сонячних технологій.

Напруга холостого ходу (U_{oc}) - це максимальна напруга, яку СЕ може розвинути за відсутності навантаження. Для прогнозування напруги холостого ходу в моделях СЕ використовують такі параметри: температура, внутрішній опір, рівень освітлення [5,6]. У математичних моделях, заснованих на термодинамічних принципах, напругу холостого ходу, можна виразити через температуру та рівень освітленості згідно виразу (2):

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left(\frac{I_F}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

де U_{oc} - напруга холостого ходу k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, e – заряд електрона, I_F – фотострум, А; I_0 – зворотний струм насичення діода.

У разі відхилень напруги холостого ходу від розрахункових значень, можна використовувати моделі для аналізу причин цих відхилень.

Напруга холостого ходу визначається рівновагою між генерацією та рекомбінацією носіїв заряду в напівпровідниковому матеріалі. Коли СЕ освітлений, фотонна енергія призводить до утворення пар «електрон-дірка». Внутрішнє електричне поле, створене р-п переходом, сприяє розподілу цих пар, спрямовуючи електрони до анода і дірки до катода. За відсутності навантаження, носії продовжують генеруватися, але рекомбінація також триває. Напруга холостого ходу досягає максимального значення, коли потоки заряду пристрої знаходяться в рівновазі, тобто швидкість генерації носіїв заряду дорівнює швидкості їх рекомбінації.

Існують різні моделі для розрахунку напруги холостого ходу, а саме: термодинамічні моделі, які ґрунтуються на принципах термодинаміки та дозволяють виразити напругу холостого ходу через температуру та рівень освітленості; моделі на основі чисельних симуляцій, які можуть враховувати ефекти, такі як градієнти температури, неоднорідності у структурі матеріалу та інші фактори, що впливають на напругу холостого ходу. Ці моделі можуть використовувати методи кінцевих елементів або інших чисельних технік для симуляції поведінки СЕ в різних умовах.

Напруга холостого ходу залежить від наступних факторів: температури; рівня освітлення; стану поверхні. Зі збільшенням температури напруга холостого ходу знижується. Це відбувається через збільшення рекомбінації носіїв заряду, що пов'язане із збільшенням теплової енергії. Такі моделі допомагають передбачити, як зміна температури вплине на напругу холостого ходу. Збільшення рівня освітлення підвищує напругу холостого ходу, оскільки збільшується струм короткого замикання. В умовах, коли рівень освітлення стає надмірно високим, можуть виникнути ефекти, пов'язані з насиченням, що також необхідно враховувати у моделях. Забруднення та різні дефекти на поверхні напівпровідника можуть знижувати напругу холостого ходу. Наявність мікротріщин або забруднень може призвести до збільшення рекомбінації, що буде видно при порівнянні експериментальних та розрахункових значень.

Аналіз відхилень напруги холостого ходу від розрахункових значень, дає змогу виявити потенційні проблеми, а саме: зниження напруги холостого ходу при підвищенні температури може свідчити, що матеріал не витримує теплових навантажень; відмінності між експериментальними даними та моделями можуть вказувати на наявність дефектів у структурі або неефективність у технології виробництва.

Моделі, що описують напругу холостого ходу можуть бути використані для розробки ефективних СЕ, а також можуть бути корисними для прогнозування довговічності СЕ. Якщо дослідження показує, що напруга холостого ходу різко знижується за певних умов, це свідчить про необхідність проведення тестів на довговічність та надійність СЕ.

Напруга холостого ходу є важливим показником ефективності СЕ. Моделі, що описують напругу холостого ходу, дозволяють не тільки передбачити її значення, але й виявити причини відхилень, що є важливим кроком до оптимізації сонячних технологій. Це робить моделювання напруги холостого ходу важливим інструментом для дослідників та виробників, які прагнуть підвищити ефективність та надійність фотоелектричних модулів.

Внутрішній опір СЕ є ключовим параметром, що визначає його продуктивність, особливо в умовах реальної

експлуатації, коли елементи працюють під навантаженням. Цей параметр відображає опір, який зазнає струм при проходженні через СЕ, і він безпосередньо впливає на вихідну потужність та ККД. Моделі СЕ можуть включати розрахунок внутрішнього опору, що дозволяє оцінити, як цей внутрішній опір впливає на вихідну потужність та ККД. Вимірюючи напругу і струм на навантаженні, можна використовувати модель визначення внутрішнього опору, що важливо для оптимізації параметрів СЕ [7,8].

При аналізі даних про внутрішній опір та його залежності від умов експлуатації можна прогнозувати, як зміни температури, вологості та інших факторів можуть впливати на продуктивність СЕ. Внутрішній опір СЕ може бути визначено, як відношення зміни напруги до зміни струму в умовах роботи елемента. При цьому важливо враховувати, що внутрішній опір може змінюватись залежно від умов навколишнього середовища та стану самого елемента.

Внутрішній опір безпосередньо пов'язаний із вихідною потужністю СЕ. Коли внутрішній опір збільшується, частина вихідної потужності втрачається у вигляді тепла, що призводить до зниження ефективної напруги та струму на виході. Це, своєю чергою, знижує загальний ККД системи.

Моделі СЕ можуть включати розрахунок внутрішнього опору на основі параметрів, таких як температура, рівень освітлення і характеристики матеріалів. Математичні моделі можуть використовувати дані про напругу холостого ходу та струму короткого замикання для оцінки внутрішнього опору. При порівнянні теоретичних значень внутрішнього опору з даними одержаними експериментальним шляхом можна виявити відхилення, що вказують на проблеми в конструкції або виробництві СЕ. Фактори, які впливають на внутрішній опір: температура; вологість; деградація матеріалів.

Зі збільшенням температури внутрішній опір СЕ, зростає. Це пов'язано зі збільшенням теплових коливань атомів у напівпровідниковому матеріалі, що зумовлює зниження рухливості носіїв заряду і, отже, збільшення опору.

Висока вологість може впливати на внутрішній опір, особливо в умовах, коли

волога проникає в структуру СЕ. Це може призводити до корозії з'єднань та збільшення опору. З часом матеріали СЕ можуть деградувати, що також призводить до збільшення внутрішнього опору. У разі підвищення рекомбінації носіїв заряду або появи тріщини у структурі напівпровідника, внутрішній опір може значно зрости.

Аналіз даних про внутрішній опір та його залежність від умов експлуатації, дозволяє прогнозувати, як зміни довкілля впливатимуть на продуктивність СЕ. Якщо внутрішній опір різко зростає за певної температури, це може бути індикатором того, що матеріали елемента недостатньо стійкі до теплових навантажень.

Розуміння впливу внутрішнього опору на вихідну потужність, дозволяє оптимізувати систему СЕ. Якщо аналіз показує, що високий внутрішній опір знижує загальну продуктивність, можна розглянути можливості для покращення технології виробництва, а саме: оптимізація конструкції СЕ; використання нових напівпровідникових матеріалів з нижчим внутрішнім опором, які можуть значно підвищити ефективність СЕ.

Таким чином, внутрішній опір є важливим параметром, який значно впливає на продуктивність СЕ. Моделі, які враховують внутрішній опір, дозволяють не лише оцінити поточну ефективність, а й прогнозувати вплив різних факторів на продуктивність, що є критично важливим для розробки та оптимізації сонячних технологій.

Фотострум - це струм, створюваний СЕ в результаті поглинання світла, що призводить до генерації вільних електронів і дірок у напівпровідниковому матеріалі. Модель СЕ, заснована на принципах фотогальваніки, дозволяє передбачати фотострум на основі інтенсивності сонячного випромінювання та спектру світла. Моделі можуть враховувати різні параметри, такі як кут падіння світла, що дозволяє точно оцінити фотоструми в різних умовах.

Порівняння модельних та експериментальних даних по фотоструму, допомагає виявити фактори, що впливають на ефективність СЕ. Якщо фотострум нижче очікуваного, це може вказувати на проблеми з оптичними властивостями матеріалу, що вимагає додаткового аналізу та корекції моделей. Фотострум

визначається згідно виразу (3), як кількість електричних зарядів, створюваних в одиницю часу під впливом світла:

$$I_F = \frac{E}{E_0} [I_{sc} + k_{I_{sc}}(T - T_0)] \quad (3)$$

де I_F – фотострум, А, E – енергетична освітленість, Вт/м², $E_0=1000$ Вт/м² – енергетична освітленість при стандартних умовах, I_{sc} – струм короткого замикання, А, $k_{I_{sc}}$ – температурний коефіцієнт струму короткого замикання, T – абсолютна температура, T_0 – поточна температура.

Фотострум пропорційний інтенсивності сонячного випромінювання, що падає поверхню СЕ. Важливо відзначити, що фотострум може залежати від спектру сонячного випромінювання, оскільки різні матеріали по-різному реагують на різні довжини хвиль світла.

Сучасні моделі СЕ враховують такі фактори, які впливають на фотострум: інтенсивність сонячного випромінювання; спектр світла; кут падіння світла. Моделі можуть використовувати дані про сонячне випромінювання в різних умовах, включаючи різні пори року та кліматичні зони, що дозволяє прогнозувати значення фотоструму для конкретних умов. Різні напівпровідникові матеріали мають різні спектри поглинання. Моделі можуть включати інформацію про взаємодію різної довжини хвиль світла із матеріалом, що дозволяє точно прогнозувати фотострум.

При зміні кута падіння, змінюється ефективна площа, на яку падає світло, і, отже, кількість фотонів, що поглинаються. Моделі можуть враховувати ці зміни для точного розрахунку фотоструму. Порівняння передбачених моделлю значень фотоструму з експериментально виміряними даними відіграє важливу роль оптимізації сонячних елементів.

До факторів, що впливають на ефективність СЕ відносяться: оптичні властивості матеріалу, якість поверхні, температура. Якщо виміряний фотострум нижче очікуваного, це може вказувати на проблеми з оптичними властивостями матеріалу, такими як розсіювання світла. Наявність забруднень або недостатня прозорість верхніх шарів може призводити до втрат світлової енергії. Нерівності та

дефекти на поверхні СЕ можуть перешкоджати нормальному проникненню світла. Дослідження поверхні СЕ за допомогою методів мікроскопії допоможе виявити такі дефекти. При підвищенні температури спостерігається зниження ефективної рухливості носіїв заряду, що може призводити до зменшення фотоструму. Моделі, що враховують теплові ефекти, дозволяють точно передбачати зміни фотоструму.

Різні матеріали по різному взаємодіють зі світлом, це дозволяє розробляти нові напівпровідники, які краще поглинають світло у широкому діапазоні довжин хвиль. Використання спеціальних покриттів зменшує відбиття світла, що може значно підвищити фотострум. Моделі допомагають передбачити, як такі покриття впливатимуть на продуктивність СЕ. Системи, які автоматично змінюють кут нахилу фотоелектричних модулів для оптимального отримання сонячного світла протягом дня, можуть значно збільшити фотострум і вихідну потужність. Постійний моніторинг фотоструму в різних умовах експлуатації також важливий для оцінки довговічності та надійності СЕ. Збір даних про фотострум з часом, дозволяє виявити потенційні проблеми, такі як деградація матеріалів або зміни в навколишньому середовищі.

Фотострум є одним з ключових параметрів, що визначають ефективність СЕ. Моделі, які враховують різні фактори, що впливають на фотострум, відіграють важливу роль у прогнозуванні продуктивності сонячних систем.

Вихідна потужність СЕ є добутком струму та напруги, що робить її критично важливою для оцінки його загальної ефективності. Максимальна вихідна потужність СЕ $P_{\max}$ визначається згідно виразу (4):

$$P_{\max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot F_z \quad (4)$$

де $P_{\max}$ — максимальна вихідна потужність СЕ, I_{sc} — струм короткого замикання, U_{oc} — напруга холостого ходу, F_z — коефіцієнт заповнення ВАХ СЕ.

Моделі СЕ дозволяють передбачити вихідну потужність залежно від струму короткого замикання, напруги холостого ходу, внутрішнього опору, зміни температури та освітлення, що дозволяє точно оцінювати продуктивність у реальних умовах.

Аналіз експериментальних даних про вихідну потужність у поєднанні з моделями, дозволяє виявити оптимальні умови експлуатації, а також визначити, як поліпшення в матеріалах або технологіях можуть підвищити ефективність перетворення сонячної енергії. Вихідна потужність залежить не тільки від максимальних значень струму та напруги, а й від реальних умов роботи СЕ.

Моделі СЕ можуть враховувати вплив зовнішніх факторів (температура, рівень освітлення) на вихідну потужність. Підвищення температури, як правило, знижує напругу холостого ходу і, отже, вихідну потужність. Моделі, що враховують термодинамічні ефекти, дозволяють передбачити, як вихідна потужність змінюватиметься за різних температурних режимів. Різні рівні сонячної радіації впливають на струм короткого замикання і, отже, вихідну потужність. Моделі, які враховують зміну рівня освітлення протягом дня та у різні сезони, дозволяють точно прогнозувати продуктивність СЕ. Порівняння модельних та експериментальних даних про вихідну потужність, дозволяє виявити оптимальні умови експлуатації фотомодулів.

Дослідження впливу на вихідну потужність використання різних матеріалів, допомагає визначити, які матеріали напівпровідників найбільш ефективні і значно збільшують вихідну потужність СЕ. Аналіз різних конструктивних рішень, таких як використання багатопарових СЕ або різних типів покриття антивідблиску, може допомогти в підвищенні вихідної потужності. Зменшення вихідної потужності протягом тривалого терміну експлуатації може бути ознакою деградації матеріалів, з яких виготовлені СЕ.

Залежність вихідної потужності від різних факторів має кілька практичних застосувань. Оптимізація вихідної потужності, дозволяє проєктувати фотоелектричні модулі з високою ефективністю за рахунок використання систем стеження за сонцем, що змінюють кут нахилу панелей для максимального отримання сонячного світла.

Дані по вихідній потужності сонячних станцій допомагає у плануванні енергосистем, заснованих на відновлюваних джерелах енергії. Це важливо для забезпечення надійності енергопостачання та управління навантаженнями.

Оцінка вихідної потужності дозволяє інвесторам та компаніям приймати обґрунтовані рішення, щодо інвестицій у сонячні технології, обираючи ті, які продемонстрували високу ефективність та надійність.

Моделювання та експериментальний аналіз дозволяють оптимізувати вихідну потужність забезпечуючи краще розуміння факторів, що впливають на продуктивність СЕ, що сприяє розробці ефективних сонячних технологій і систем, сталого енергетичного майбутнього.

Важливою характеристикою СЕ є ККД, що показує, яку частку сонячної енергії перетворює СЕ в електричну енергію. ККД розраховується, згідно виразу (5) як відношення вихідної потужності ($P_{вих}$) до потужності сонячного випромінювання, що падає на СЕ P_p .

$$\eta_{KPD} = \frac{P_{вих}}{P_p} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_p}, \quad (5)$$

де η – коефіцієнт корисної дії СЕ, $P_{вих}$ – вихідна потужність, I_m і U_m – величина струму й напруга, що відповідають точці найбільшої потужності P_{max} , P_p – потужність випромінювання, що падає на СЕ.

Модель СЕ дозволяє обчислити ККД, ґрунтуючись на вихідній потужності та рівні освітлення. Оптимізація моделей на основі експериментальних даних дозволяє передбачити, як різні зміни в конструкції та матеріалах можуть вплинути на ККД. Якщо ККД нижче за розрахунковий, це може вказувати на необхідність оптимізації конструкції, поліпшення якості матеріалів або застосування нових технологій [9].

Таким чином, модель СЕ служить важливим інструментом для аналізу та оптимізації його ключових характеристик, а саме: струму короткого замикання, напруги холостого ходу, внутрішнього опору, фотоструму, вихідної потужності та ККД. Модель СЕ дозволяє не тільки передбачати поведінку елемента в різних умовах, але й виявляти потенційні проблеми, що є критично важливим для підвищення ефективності та надійності СЕ.

Високий ККД означає, що СЕ здатний ефективно використовувати доступне сонячне випромінювання, що робить його привабливішим з економічної точки зору. Моделі СЕ дозволяють обчислити ККД на основі вихідної потужності та рівня сонячного освітлення. Важливо відзначити,

що ККД залежить від ряду факторів: виду матеріалів, значення температури,

Різні напівпровідникові матеріали мають різні коефіцієнти поглинання та рекомбінації, що впливає на ККД. Моделі, що враховують властивості матеріалів, допомагають передбачити, як зміни у конструкції чи використанні нових технологій можуть вплинути на ККД.

Моделі, що враховують термодинамічні ефекти, можуть передбачити, як ККД зміниться зі зміною температури. У разі підвищення температури ефективність рекомбінації носіїв заряду може знижуватися, що призводить до падіння ККД. Порівняння модельних та фактичних значень ККД дозволяє виявити напрямки його підвищення. Якщо фактичний ККД нижче за розрахунковий, це може вказувати на необхідність оптимізації конструкції СЕ.

Покращення якості напівпровідників та інших матеріалів, що використовуються, може підвищити ККД. Моделі, які включають дані про якість матеріалів, дозволяють передбачити, як їх поліпшення може позначитися на ефективності СЕ.

Впровадження нових технологій, таких як перовскітні СЕ або багат шарові конструкції, може значно підвищити ККД. Моделі, що враховують такі технології, дозволяють прогнозувати їхній вплив на ефективність. Значення ККД є важливим для низки практичних завдань. ККД допомагає вибрати ефективні технології для використання в сонячних системах, що важливо для мінімізації витрат на виробництво та встановлення. Значення ККД різних СЕ допомагає планувати енергетичні стратегії, забезпечуючи надійне та ефективне використання сонячної енергії. Високий ККД робить сонячні технології привабливими для інвестицій, що може сприяти зниженню цін на сонячну енергетику.

Важливим показником ефективності СЕ є ККД. Моделювання ККД у поєднанні з експериментальними даними дозволяє виявляти можливості для оптимізації та покращення технологій, що є критично важливим для подальшого розвитку сонячної енергетики та підвищення її конкурентоспроможності на ринку. В таблиці 1 та Рис.1 та Рис.2 показані результати моделювання залежності напруги холостого ходу та фотоструму від внутрішнього опору СЕ.

Таблиця 1

Результати моделювання залежності напруги холостого ходу та фотоструму від внутрішнього опору СЕ

Table 1

Results of modeling the dependence of the open-circuit voltage and photocurrent on the internal resistance of the Solar Cell

№	R, Ом	U, В	I, mA
1	6,5	0,68	1032
2	21,7	2,33	1021
3	44,7	4,3	945
4	115	8,52	784
5	235	11,97	521
6	250	12,03	475
7	275	12,13	446
8	340	12,28	362
9	478	12,87	271
10	924	13,25	143
11	1005	13,56	0

З графіку на Рис. 2 видно, що фотострум, зменшується при зростанні внутрішній опору СЕ до значення 1005 Ом. З графіку на Рис. 3 видно, що напруга

зростає від 0 до 12 В, при досягненні 235 Ом напруга стабілізується та досягає значення 13,5 В.

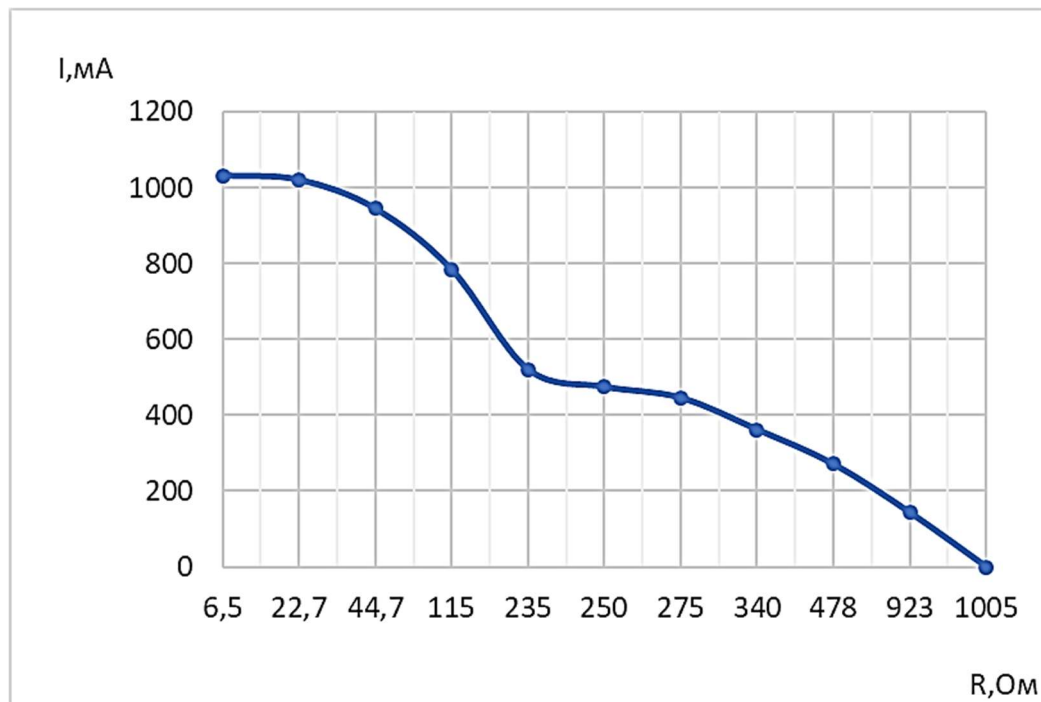


Рис. 2 – Графік залежності фотоструму від внутрішнього опору СЕ
Fig. 2 – Graph of the dependence of photocurrent on the internal resistance of the CE

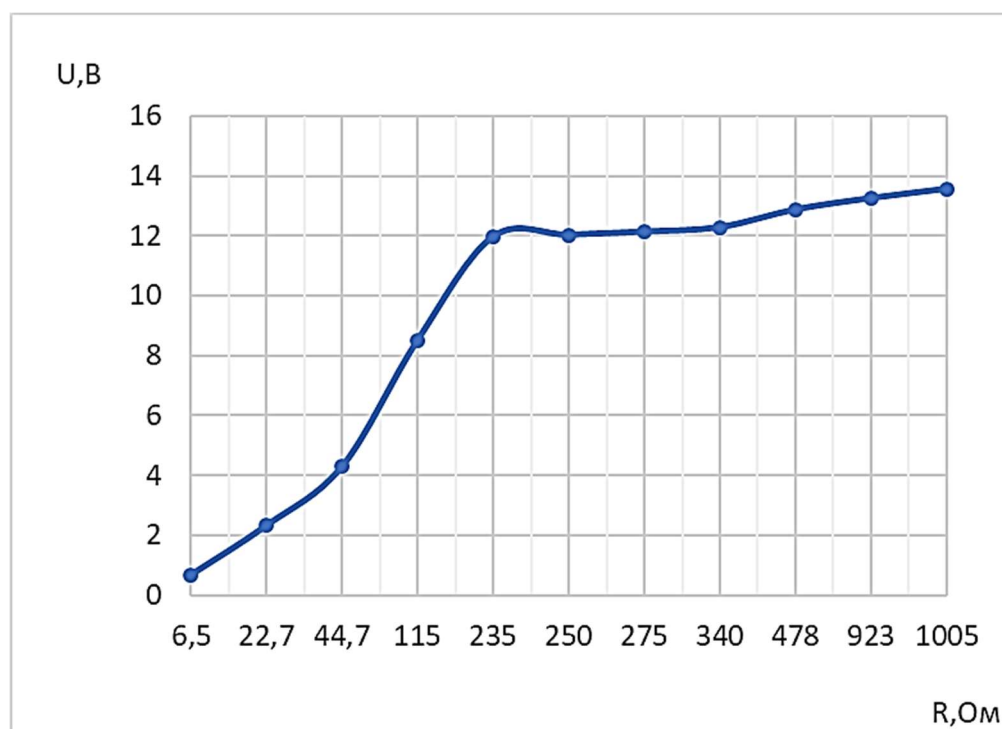


Рис. 3 – Графік залежності напруги холостого ходу від внутрішнього опору СЕ
Fig. 3 – Graph of the dependence of the open-circuit voltage on the internal resistance of the CE

Використання моделей кількісних та якісних показників параметрів СЕ сприяє отриманню наукових результатів, які підвищують ефективність, якості та надійності сонячних технологій, що підтримує розвиток сталих енергетичних рішень і сприяє переходу до екологічно чистих джерел енергії.

Моделювання СЕ допомагає оптимізувати конструкцію фотомодулів, що збільшує їх ККД. Це дозволить ефективно використовувати сонячну енергію та знизити витрати на її виробництво.

Дослідження в області фотогальваніки сприяють створенню нових високоефективних матеріалів, таких як перовскіти або органічні сполуки. Моделі допоможуть передбачити їх поведінку та характеристики.

Моделі СЕ можуть бути адаптовані для прогнозування продуктивності СЕ у різних кліматичних умовах, що дозволить розробити універсальні рішення для сонячних систем. Моделі СЕ дозволять краще зрозуміти, як СЕ можуть ефективно працювати в комбінації з іншими

відновлюваними джерелами енергії, такими як вітрова або гідроенергетика, створюючи гнучкі енергосистеми. За допомогою моделей СЕ можна передбачати термін служби СЕ та виявляти потенційні проблеми, що забезпечить ефективне обслуговування та управління у інформаційно-вимірювальних системах.

Моделі дозволять створити інформаційно-вимірювальні системи, які автоматично адаптуватимуть роботу сонячних установок залежно від поточних умов, підвищуючи загальну ефективність. Оптимізація виробничих процесів із використанням моделей допоможе скоротити витрати на матеріали, що зробить сонячні технології доступними. Моделювання дозволяє виявити та усунути слабкі місця у конструкції та матеріалах СЕ, що веде до створення надійних та довговічних СЕ. Використання моделей СЕ в освітніх закладах сприяє розвитку наукових досліджень у галузі відновлюваних джерел енергії та формуванню нових фахівців у цій галузі.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що моделі сонячних елементів є ключовим інструментом для наукового обґрунтування, проектування та оптимізації фотоелектричних систем. Їх застосування забезпечує формування цілісного уявлення про електрофізичні процеси, що відбуваються в сонячних елементах, та дозволяє інтегрувати різноманітні параметри в єдину аналітичну систему.

Встановлено, що використання системного підходу до моделювання сприяє ідентифікації критичних факторів, які обмежують ефективність функціонування сонячних елементів, а також дозволяє обґрунтовувати напрями їх технічного вдосконалення. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними забезпечує верифікацію моделей, виявлення причин відхилень та створює передумови для підвищення точності розрахунків вихідної потужності та коефіцієнта корисної дії.

Доведено, що врахування зовнішніх експлуатаційних факторів, зокрема температури, рівня освітленості та інших кліматичних параметрів, є необхідною умовою адекватного відтворення реальних режимів роботи сонячних елементів. Це дозволяє підвищити достовірність прогнозування їх енергетичної продуктивності та забезпечити адаптацію моделей до змінних умов функціонування.

Обґрунтовано доцільність використання моделей для прогнозування деграда-

ційних процесів, що є важливим для оцінювання надійності, планування режимів експлуатації та визначення терміну служби фотоелектричних модулів. Застосування відповідних моделей дає змогу кількісно оцінювати як поточні, так і довгострокові зміни параметрів вольт-амперних характеристик.

Показано, що сучасні підходи до моделювання сонячних елементів потребують подальшого розвитку в напрямі деталізації матеріалознавчих аспектів, зокрема врахування електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів, їх мікроструктурних характеристик та температурно-залежних ефектів. Інтеграція зазначених факторів у моделі дозволить суттєво підвищити точність прогнозування ефективності функціонування фотоелектричних систем у реальних умовах експлуатації.

Таким чином, удосконалення моделей сонячних елементів є важливим науково-практичним напрямом, що сприятиме підвищенню ефективності використання сонячної енергії, забезпеченню енергетичної стійкості та розвитку відновлюваної енергетики в умовах зростаючих екологічних та економічних викликів. Застосування адекватних моделей дозволяє підвищити обґрунтованість інженерних рішень, забезпечити точність прогнозування генерації електроенергії та досягти економічної та екологічної ефективності функціонування фотоелектричних систем.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Моделювання основних характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів n-ZnS/p-CdTe і n-CdS/p-CdTe / А. С. Опанасюк, Д. І. Курбатов, Т. О. Берестюк, О. А. Доброжан, Р. В. Лопатка. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. 2013. № 18. С. 149–155.
2. Гаєвський О. Ю., Іванчук В. Ю. Моделювання вольт-амперної характеристики фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3(78). С. 54-61. DOI : [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61)
3. Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory / Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies. 2021 Vol. 3, no. 8(111). Pp. 75–89. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.235882>

4. Буджак Я. С., Єрохов В. Ю., Мельник І. І. Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. 2011. № 4/8(52). С. 24-29.

5. Моделювання залежності зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів / М. О. Слабінога, Ю. М. Кучірка, О. С. Криницький, Н. М. Юрків. *Методи та прилади контролю якості*. 2018. № 2(41). С. 18–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-18-24](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-18-24)

6. Мороз В. І.; Турич О. В. Комп'ютерне моделювання сонячних батарей. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Електроенергетичні та електромеханічні системи, 2012. № 736. С. 104-108.

7. Кривда В., Василенко О., Федорова М. Моделювання електричних характеристик сонячної панелі. *Електротехніка та комп'ютерні системи*, 2017. № 26(102). С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.26.102.2017.3>

8. Мартинюк В. І., Клен К. С., Жуйков В. Я. Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними. *Мікросистеми, Електроніка та Акустика*. 2021. № 26(2). С. 237316–1. doi: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.237316> .

9. Підвищення ефективності промислових зразків кремнієвих сонячних елементів / Р. В. Зайцев, М. В. Кіріченко, К. О. Мінакова, А. М. Дроздов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, 2021. № 2(3). С. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.01>

10. Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor / Budanov P., Khomiak E., Kyrysov I., Brovko K., Kalnoy S., Karpenko O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 4, № 8(118). Pp. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>

11. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента / І. Г. Кирисов, П. Ф. Буданов, Е. А. Хом'як, К. Ю. Бровко. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. № 1. С. 35-38. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38>

12. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2022. Вип. 29. С. 104-117. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-104-117>

13. Budanov P., Kyrysov I. Qualimetric method of quality assessment of solar battery parameters. *Машинобудування* : зб. наук. пр. Харків, 2024. Вип. 33. С. 64-77. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-64-77>

Отримано: 14.04.2026 / Переглянуто: 15.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

KYRYSOV I., Doctor of Philosophy,

Senior Lecturer, Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: igorkirisov@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>

MELNYKOV V., Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6427-6805>

BUDANOV M., Doctor of Philosophy,

Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: budanov@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8032-0562>

PONOMARENKO O.,

Assistant Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering

e-mail: olena.ponomarenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4573-1777>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

RESEARCH OF QUANTITATIVE AND QUALITATIVE PARAMETERS OF THE SOLAR CELL MODEL

The article provides a comprehensive analysis of modern models of solar cells that describe their electrophysical characteristics and internal processes of converting solar energy into electricity. The approaches to mathematical modeling of photovoltaic converters are summarized, taking into account their structural and material features and physical mechanisms of generation and recombination of charge carriers.

The dependence of the main photovoltaic parameters of solar cells on the influence of external and internal factors, in particular temperature, intensity and spectral composition of solar radiation, is studied. It is established that an increase in temperature leads to the degradation of key operational characteristics, in particular the efficiency, open circuit voltage, fill factor and current-voltage characteristics. It is substantiated that these changes are due to variations in the bandgap width, an increase in the level of recombination processes and a decrease in the mobility of charge carriers in semiconductor materials.

An improved method for calculating the main electrophysical parameters of solar cells, in particular the short-circuit current and open-circuit voltage, has been developed, which is based on taking into account the multilayer structure of materials, their physicochemical properties and operating conditions. The proposed approach allows to increase the accuracy of determining the output power, efficiency and stability of the current-voltage characteristics in real operating conditions.

Particular attention is paid to the analysis of the influence of changes in illumination, including variations in the intensity and spectral composition of solar radiation, which significantly affect the generation of photocurrent and the formation of output electrical parameters. It is shown that dynamic changes in lighting conditions during the day or in conditions of unstable radiation cause nonlinear changes in the characteristics of solar cells, which must be taken into account when modeling and operating them.

The need for further improvement of existing models of solar cells by integrating temperature, spectral and structural factors is justified, which will ensure increased reliability of calculations and efficiency of functioning of photovoltaic systems in real operating conditions.

Keywords: solar cell, solar cell model, photovoltaic conversion, mathematical modeling, electrophysical parameters, efficiency, current-voltage characteristic, information and measuring systems, qualimetry, photovoltaic module.

In cites: Kyrysov I., Melnykov V., Budanov M., Ponomarenko O. (2026) Research of quantitative and qualitative parameters of the solar cell model. Engineering, (37), 49-63. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-04> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Opanasiuk, AS, Kurbatov, DI, Berestiuk, TO, Dobrozhan, OA & Lopatka, RV 2013, 'Modeliuvannia osnovnykh kharakterystyk soniachnykh elementiv na osnovi heteroperekhodiv n-

ZnS/p-CdTe i n-CdS/p-CdTe' [Modeling of the basic characteristics of sonic elements based on n-ZnS/p-CdTe and n-CdS/p-CdTe heterojunctions], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Novi rishennia u suchasnykh tekhnolohiiakh, no 18, Pp. 149–155.

2. Haievskiy, OYu & Ivanchuk, VYu 2024, 'Modeliuvannia volt-ampernoï kharakterystyky fotoelektrychnoho modulia zi zminnymy faktorom idealnosti ta zvorotnym strumom nasychennia' [Modeling of the volt-ampere characteristics of a photovoltaic module with a variable ideality factor and reverse saturation current], *Vidnovliuvana enerhetyka*, no 3(78), Pp. 54-61.

3. Budanov, P, Kyrysov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a solar element model using the method of fractal geometry theory' *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, no. 8(111). Pp. 75–89. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).54-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61) (in Ukraine)

4. Budzhak, YaS, Yerokhov, Vlu & Melnyk, II 2011, 'Prohnozuvannia i rozrakhunok fotoelektrychnoho peretvoriuvacha iz zadanyimi kharakterystykamy' [Prediction and calculation of a photoelectric converter with given characteristics], *Skhidnoievropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no 4/8(52), Pp. 24-29.

5. Slabinoha, MO, Kuchirka, YuM, Krynytskyi, OS & Yurkiv, NM 2018, 'Modeliuvannia zalezhnosti zminy potuzhnosti soniachnykh panelei vid kuta padinnia promeniv' [Modeling the dependence of the power change of solar panels on the angle of incidence changes], *Metody ta prylady kontroliu yakosti*, no 2(41), Pp. 18–24. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2\(41\)-18-24](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2018-2(41)-18-24) (in Ukraine)

6. Moroz, VI & Turych, OV 2012, 'Kompiuterne modeliuvannia soniachnykh batarei' [Computer modeling of sonic batteries], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Elektroenerhetychni ta elektromekhanichni systemy*, no 736, Pp. 104-108.

7. Kryvda, V, Vasylenko, O & Fedorova, M 2017, 'Modeliuvannia elektrychnykh kharakterystyk soniachnoi paneli' [Modeling of electrical characteristics of a solar panel], *Elektrotekhnika ta kompiuterni systemy*, no 26(102), Pp. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15276/eltecs.26.102.2017.3> (in Ukraine)

8. Martyniuk, VI, Klen, KS & Zhuikov, VYa 2021, 'Vyznachennia parametriv skhem zamishchennia soniachnykh panelei za eksperymentalnyimi danymi' [Determination of parameters of the scheme of placement of sonic panels based on experimental data], *Mikrosystemy, elektronika ta akustyka*, no 26(2), Pp. 237316-1. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.mea.237316> (in Ukraine)

9. Zaitsev, RV, Kirichenko, MV, Minakova, KO & Drozdov, AM 2021, 'Pidvyshchennia efektyvnosti promyslovykh zrazkiv kremniievykh soniachnykh elementiv' [Increasing the efficiency of industrial samples of silicon solar cells], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist, no 2(3), Pp. 75-83. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.01> (in Ukraine)

10. Budanov, P, Khomiak, E, Kyrysov, I, Brovko, K, Kalnoy, S & Karpenko, O 2022, 'Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4, no 8(118). Pp. 60-70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374> (in Ukraine)

11. Kyrysov, IH, Budanov, PF, Khomiak, EA & Brovko, KYu 2022, 'Pidkhody ta vymohy do modeliuvannia struktury napivprovodnykovoho sharu soniachnoho elementa' [Approaches and requirements for modeling the structure of the semiconductor layer of a sonic element], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, no 1, Pp. 35-38. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-35-38> (in Ukraine)

12. Kyrysov, IH & Budanov, PF 2022, 'Metody doslidzhen pohlynaiuchoï poverkhni soniachnykh elementiv' [Methods of studying the absorption of surface sonic elements], *Engineering*, iss 29, Pp. 104-117. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29-104-117> (in Ukraine)

13. Budanov, P & Kyrysov, I 2024, 'Qualimetric method of quality assessment of solar battery parameters' , *Engineering*, iss 33, Pp. 64-77. <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-64-77> (in Ukraine)

Submission received: 04.14.2026/Revised: 05.15.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05>

УДК 658.62.018.012

¹**ПРОКОПЕНКО О. О.**, кандидат технічних наук,

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: o.o.prokopenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-3056>

¹**АНТОНЕНКО Н. С.**, кандидат технічних наук,

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: n.s.antonenko@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0879-1642>

²**ТЮПА І.**, кандидат технічних наук,

заступник директора з охорони праці, технічної безпеки та підготовки кадрів

e-mail: igortyupa9@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8705-9122>

¹**ХАЛІМОВ Д. В.**,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0919-8232>

¹**ХАЛІМОВ П. В.**,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: remontkhalimov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6484-5872>

¹**ЮРЕЧКО Д. О.**, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій

e-mail: yurechko.dima@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1389-6953>

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

²КП Харківські теплові мережі

вул. Мефодіївська 11, м. Харків,

СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ НОРМУВАННЯ ВІБРАЦІЇ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ДАНИХ

У роботі запропоновано новий підхід до нормування загального рівня вібрації газоперекачувальних агрегатів (ГПА), що ґрунтується на статистичному аналізі великої вибірки експлуатаційних даних. На відміну від традиційних методів, які спираються на фіксовані нормативи або емпіричні рекомендації міжнародних стандартів, запропонована методика використовує критерій Неймана-Пірсона для визначення оптимального порогового рівня вібрації, що мінімізує ймовірність хибного рішення щодо технічного стану агрегату.

Побудовано математичні моделі розподілу вібраційної швидкості, що враховують як гармонічні складові, так і шумові компоненти спектра. Показано, що для реальних умов експлуатації найбільш адекватним є використання моделі сумарної вібрації як комбінації розподілів Релея з різними дисперсіями. На основі експериментальних даних парку ГПА-10 (310 агрегатів) визначено статистичні параметри вібрації та розраховано граничні рівні за двома варіантами: через другий момент розподілу та за правилом «трих сигм».

Отримані результати свідчать, що чинні нормативи вібрації значно перевищують статистично обґрунтовані значення, що може призводити до зниження ресурсу агрегатів та підвищення аварійності. Запропонований підхід дозволяє формувати науково обґрунтовані норми вібрації для конкретних точок вимірювання та забезпечує підвищення надійності експлуатації без додаткових витрат.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: віброшвидкість, газоперекачувальний агрегат, статистичне нормування, критерій Неймана-Пірсона, розподіл Релея, надійність, діагностика, спектральний аналіз.

Як цитувати: Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Тюпа І., Халімов Д. В., Халімов П. В., Юречко Д. О. Статистичні методи нормування вібрації газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу експлуатаційних даних. Машнобудування. 2026. Вип. 37. С. 64-76. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05>



Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблематика вібраційного контролю та статистичного нормування технічного стану газоперекачувальних агрегатів активно розвивається впродовж останніх десятиліть. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанням формування достовірних діагностичних критеріїв, які враховують стохастичну природу вібраційних процесів [9, 13], спектральну структуру сигналів [12, 18] та вплив експлуатаційних факторів [14].

У низці робіт, присвячених аналізу роторних машин та компресорного обладнання, підкреслюється важливість використання статистичних моделей розподілу віброшвидкості, зокрема моделей на основі розподілу Релея, Вейбулла та їхніх комбінацій [13, 19]. Дослідники відзначають, що такі моделі адекватно описують поведінку вібраційних сигналів у реальних умовах експлуатації, де гармонічні складові поєднуються з широкосмуговим шумом [12, 18].

Окремий напрям досліджень стосується порогового нормування. У роботах, присвячених методам технічної діагностики, доведено, що фіксовані нормативи, які не враховують статистичну мінливість параметрів, можуть призводити до хибних рішень - як у бік надмірного технічного обслуговування, так і у бік пропуску небезпечних станів [10, 16]. Тому сучасні підходи орієнтуються на критерії

оптимальності, серед яких особливе місце займає критерій Неймана-Пірсона, що дозволяє мінімізувати ймовірність помилок першого та другого роду [16].

У дослідженнях, присвячених газотранспортному обладнанню, наголошується на необхідності використання великих вибірок експлуатаційних даних для формування надійних статистичних норм [5, 6, 17]. Це пов'язано з тим, що вібраційні характеристики агрегатів одного типу можуть суттєво відрізнятися залежно від умов роботи, ступеня зношування, режимів навантаження та конструктивних особливостей.

Також у сучасній літературі активно розвивається напрям спектрально-статистичного аналізу, який поєднує класичні методи спектральної діагностики з математичними моделями випадкових процесів [12, 18]. Такий підхід дозволяє точніше оцінювати співвідношення між гармонічними та шумовими складовими, визначати параметри «сигнал-шум» [15] та формувати обґрунтовані порогові рівні [10].

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить про актуальність переходу від нормативів, заснованих на емпіричних рекомендаціях [1, 3, 4], до статистично обґрунтованих методів нормування, що враховують реальні експлуатаційні дані та мінімізують ризики хибних діагностичних рішень [5, 9, 10, 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забезпечення надійної та безпечної роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) є одним із ключових завдань сучасних систем газотранспорту. Вібраційний стан агрегатів безпосередньо впливає на їх ресурс, енергоефективність та ймовірність виникнення аварійних ситуацій, тому контроль вібрації є невід'ємною складовою технічної діагностики [1, 5, 14]. Традиційні підходи до нормування вібрації, що базувалися на галузевих нормативних документах 1980-х років, не враховують реальних статистичних характеристик експлуатаційних процесів та сучасних вимог до оцінювання технічного стану обладнання [2, 3, 4].

У зв'язку з цим актуальним є застосування методів математичного моделювання та статистичного аналізу для визначення порогових рівнів віброшвидкості, які відповідають фактичним умовам роботи агрегатів [9, 13, 17]. Міжнародні стандарти серії ISO 20816 та їх національні аналоги [7, 8] регламентують сучасні підходи до вимірювання та оцінювання вібрації машин, однак не враховують специфіку вібраційних процесів газоперекачувальних агрегатів у реальних умовах експлуатації [5, 6, 14].

Тому виникає необхідність у розробленні статистично обґрунтованих критеріїв нормування, які базуються на аналізі випадкових та детермінованих

складових вібросигналу, оцінюванні ймовірностей хибних діагностичних рішень [10, 16] та визначенні порогових значень віброшвидкості з урахуванням фактичних експлуатаційних даних [5, 6, 17].

Метою роботи є розроблення статистично обґрунтованого підходу до нормування рівнів віброшвидкості газоперекачувальних агрегатів на основі аналізу великої вибірки експлуатаційних даних. На відміну від традиційних нормативних методик, запропонований підхід передбачає:

- побудову математичних моделей розподілу вібраційних параметрів, що враховують гармонічні та шумові складові сигналу;
- визначення оптимальних порогових рівнів віброшвидкості за критерієм Неймана–Пірсона;

- оцінювання ймовірності хибних діагностичних рішень залежно від вибраного порогу;

- порівняння статистично обґрунтованих норм із чинними нормативами для агрегатів типу ГПА-10;

- формування рекомендацій щодо підвищення надійності та безаварійності експлуатації газотранспортного обладнання.

Досягнення цієї мети дозволяє перейти від емпіричного нормування до науково обґрунтованої системи контролю технічного стану, що базується на реальних даних та мінімізує ризики помилкових рішень.

Виклад основного матеріалу

Чинні нормативи вібрації для газоперекачувальних агрегатів, що застосовуються на компресорних станціях, здебільшого базуються на рекомендаціях міжнародних стандартів ISO та VDI. Ці стандарти визначають граничні рівні віброшвидкості для різних класів машин, але не враховують специфіку газотранспортного обладнання, особливості його конструкторції та реальні експлуатаційні умови.

Порівняння статистично обґрунтованих порогів із чинними нормами показує суттєві розбіжності. Зокрема: статистично розраховані пороги віброшвидкості є нижчими, ніж нормативні значення, що застосовуються на практиці; нормативи ISO/VDI допускають значно вищі рівні вібрації, які для газоперекачувальних агрегатів можуть бути критичними; підвищені нормативи призводять до зменшення ресурсу підшипникових вузлів, збільшення частоти ремонтів та ризику аварійних зупинок; статистичний підхід дозволяє адаптувати пороги до конкретних точок вимірювання, що особливо важливо для агрегатів типу ГПА-10, де вібраційна картина суттєво відрізняється між опорами.

У практиці експлуатації часто спостерігається ситуація, коли агрегат формально відповідає нормативам, але демонструє ознаки деградації. Це пояснюється тим, що нормативи не враховують:

- індивідуальні особливості агрегату;
- накопичення дефектів у часі;
- статистичну мінливість параметрів;
- вплив режимів навантаження.

Статистично обґрунтовані пороги, навпаки, дозволяють: виявляти ранні ознаки дефектів, зменшувати кількість хибних рішень, підвищувати точність діагностики, оптимізувати графіки технічного обслуговування.

Вібраційні процеси в газоперекачувальних агрегатах є результатом взаємодії багатьох фізичних чинників, серед яких домінують динаміка ротора, газодинамічні навантаження, стан підшипникових вузлів та конструктивні особливості агрегату. У реальних умовах вібраційний сигнал має стохастичну природу і може бути поданий як сума детермінованої та випадкової складових:

$$V(t) = V_F(t) + V_{\text{ш}}(t), \quad (1)$$

де $V_F(t)$ - гармонічна компонента, пов'язана з обертанням ротора;

$V_{\text{ш}}(t)$ - шумова складова, що моделюється випадковим процесом із нульовим середнім значенням.

Гармонічна складова описується виразом:

$$V_F(t) = A \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де A - амплітуда першої гармоніки,

ω - кутова частота,

φ - початкова фаза.

Шумова складова характеризується дисперсією $\sigma_{\text{ш}}^2$, яка визначає рівень випадкових збурень у системі.

У випадку, коли випадкова складова є домінуючою, амплітудний розподіл віброшвидкості описується законом Релея:

$$p(V) = \frac{V}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{V^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

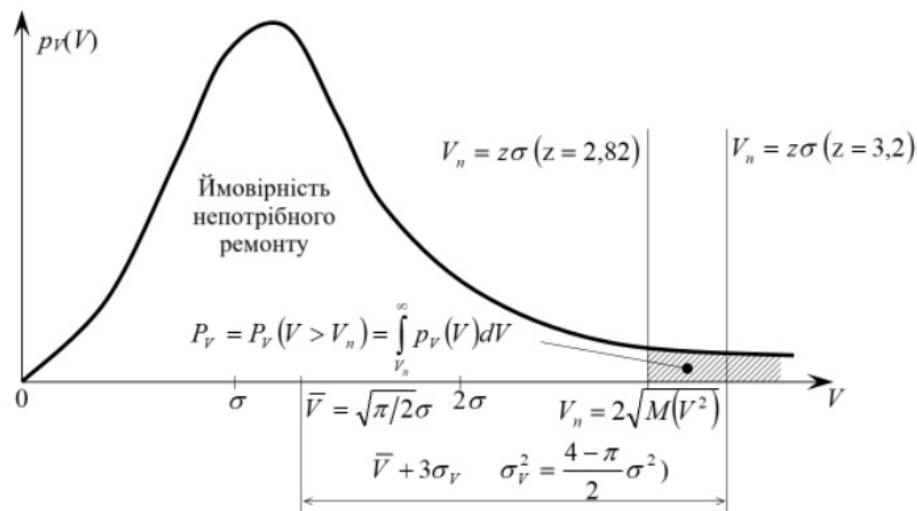


Рис. 1 – Графічне визначення порогового рівня віброшвидкості за законом розподілу Релея для агрегатів у нормальному технічному стані

Fig. 1 – Graphical determination of the threshold level of vibration velocity according to the Rayleigh distribution law for units in normal technical condition

Основні статистичні характеристики розподілу мають вигляд:

$$\bar{V} = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad M(V^2) = 2\sigma^2, \quad \sigma_V^2 = \frac{4-\pi}{2} \sigma^2,$$

де $\bar{V}$ - математичне сподівання віброшвидкості,

$M(V^2)$ - другий момент,

σ_V^2 - дисперсія випадкової величини V .

Для відокремлення нормального стану агрегату від потенційно небезпечного вводиться пороговий рівень віброшвидкості, який позначимо через V_n . Це значення визначає межу, при

Де V - миттєве значення віброшвидкості,

σ - параметр масштабу, пов'язаний із дисперсією шумової складової,

$p(V)$ - щільність ймовірності появи значення V .

Параметр σ визначає середній рівень випадкових коливань і є ключовим для подальшого нормування.

Викладене добре узгоджується з експлуатаційними даними для парку агрегатів у нормальному стані. На рисунку 1 наведено графічну інтерпретацію цього розподілу та визначення порогового рівня V_n .

перевищенні якої система діагностики фіксує відхилення від норми.

Пороговий рівень може визначатися кількома способами. Один із них ґрунтується на другому моменті розподілу:

$$V_n = 2\sqrt{M(V^2)} = 2\sqrt{2}\sigma, \quad (4)$$

де $M(V^2)$ - другий момент випадкової складової.

Інший варіант базується на правилі «трьох сигм»:

$$V_n = \bar{V} + 3\sigma_V, \quad (5)$$

де $\bar{V}$ - середнє значення віброшвидкості,

σ_V - стандартне відхилення.

Ймовірність хибного спрацювання системи контролю при цьому визначається як:

$$P_{\text{хибн}} = P(V > V_n) = \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (6)$$

Для підвищення точності діагностики застосовується критерій Неймана-Пірсона, який забезпечує оптимальний вибір порогу між гіпотезами:

H_0 : агрегат справний,

H_1 : агрегат має дефект.

Графічне представлення критерію наведено на рисунку 2.

Ймовірність пропуску дефекту визначається як:

$$\beta = \int_{-\infty}^{V_n} p_X(V) dV, \quad (7)$$

де β - імовірність того, що значення V залишиться нижчим за поріг, незважаючи на наявність дефекту.

Ймовірність хибного спрацювання:

$$\alpha = \int_{V_n}^{\infty} p_T(V) dV, \quad (8)$$

де α - імовірність того, що нормальний стан буде помилково класифіковано як дефект.

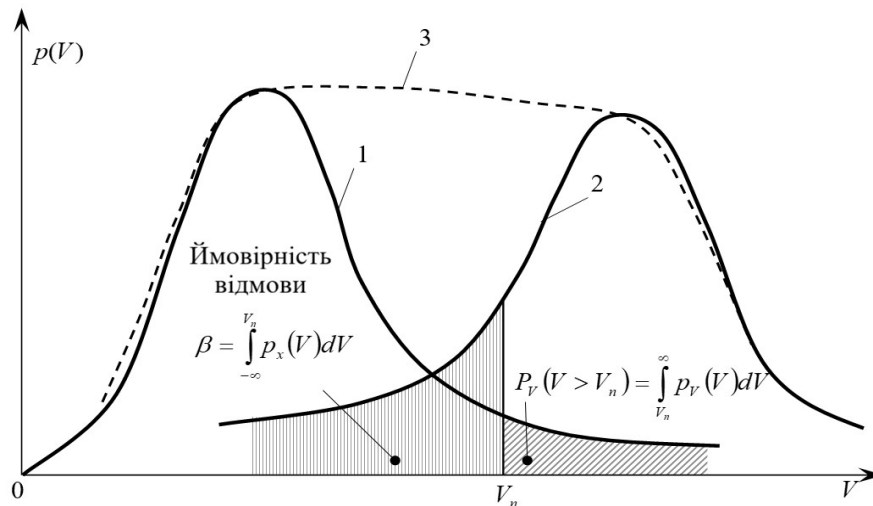


Рис. 2 – Вибір гіпотези про непотрібний ремонт з урахуванням критерію Неймана - Пірсона:

1 - щільність ймовірності нормальної роботи ; 2 - щільність ймовірності відмови;

3 - спільна щільність ймовірності тривоги відмови

Fig. 2 – Choosing a hypothesis about unnecessary repairs taking into account the Neumann-Pearson criterion:

1 - probability density of normal operation; 2 - probability density of failure;

3 - joint probability density of failure alarm

Для моделювання реальних вібраційних процесів використовується спектральний аналіз. На рисунку 3 наведено три типові моделі спектральної щільності віброшвидкості :

модель «гармоніка + шум»,

модель «гармоніки і шум»,

модель суми вузькосмугових процесів.

У загальному вигляді спектральна щільність може бути подана як:

$$G(f) = G_{\text{ш}} + \sum_{k=1}^n G_k \delta(f - kf_r), \quad (9)$$

де $G(f)$ - спектральна щільність віброшвидкості,

$G_{\text{ш}}$ - рівень шуму,

G_k - амплітуди гармонік,

f_r - частота обертання ротора,

δ - дельта-функція Дірака.

Для оцінювання якості сигналу використовується параметр «сигнал-шум»:

$$\alpha = \frac{\sigma_r}{\sigma_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

де σ_r - дисперсія гармонічної складової,

$\sigma_{\text{ш}}$ - дисперсія шуму.

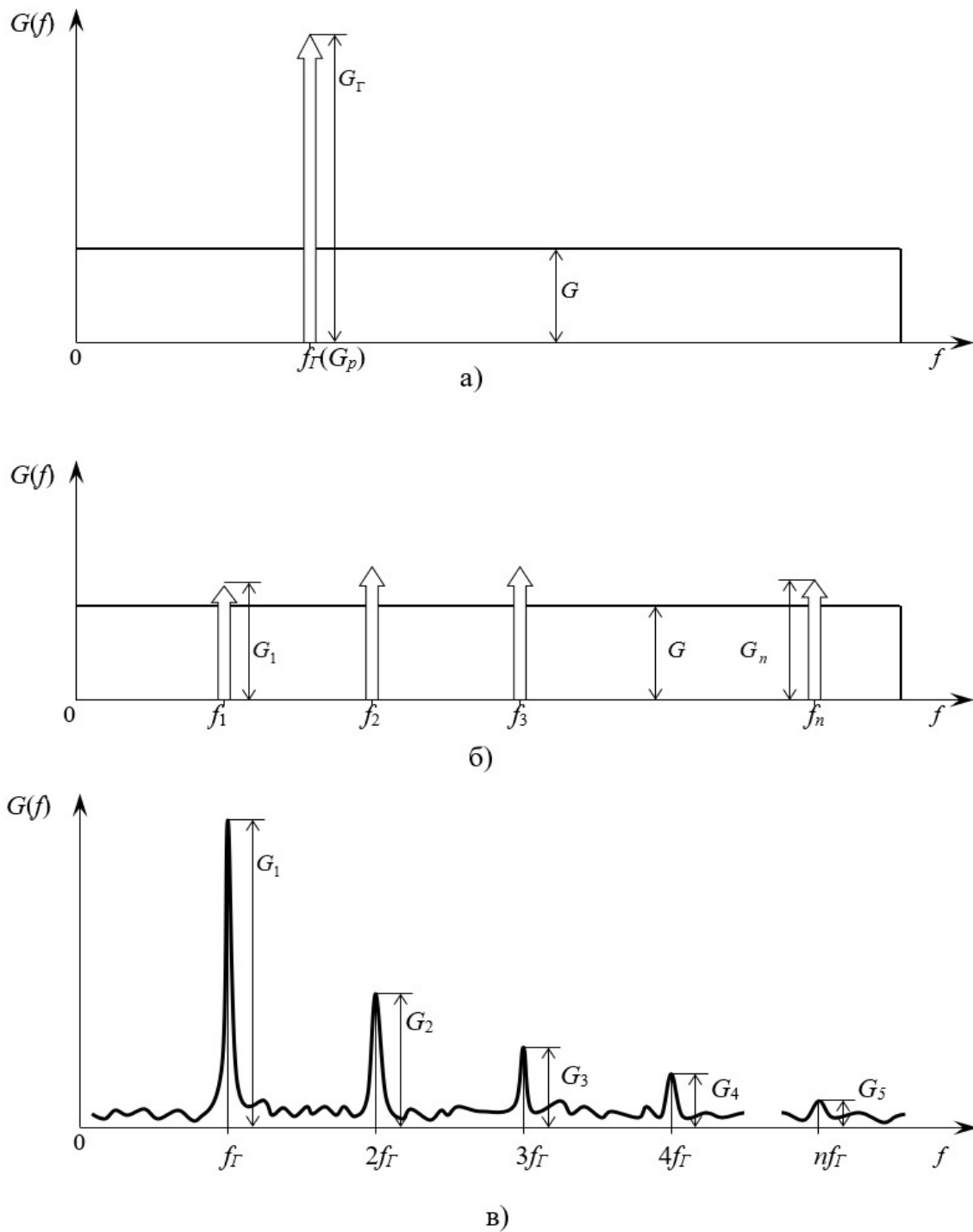


Рис.3 – Спектральна щільність віброшвидкості моделей вібрації:
 а) "гармоніка + шум"; б) "гармоніки в шумі"; в) сума вузькосмугових процесів
Fig. 3 – Spectral density of vibration velocity of vibration models:
 а) "harmonic + noise"; б) "harmonics in noise"; в) sum of narrowband processes

Для аналізу технічного стану агрегатів типу ГПА-10 використовуються статистичні параметри віброшвидкості, отримані на основі експлуатаційних вимірювань.

Табл. 1 містить середньоквадратичні значення віброшвидкості, коефіцієнти гармонік і шуму, ймовірності відмови для двох варіантів порогів та граничні значення віброшвидкості.

1. Середньоквадратичне значення віброшвидкості $V_{СКЗ}$

$$V_{СКЗ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}, \quad (11)$$

де $V^2(t)$ - миттєве значення віброшвидкості;

T - тривалість інтервалу вимірювання.

Ця величина характеризує загальний енергетичний рівень вібрації в контрольній точці.

2. Коефіцієнт гармонік

$$b = \frac{V_{\text{гарм}}}{V_{СКЗ}}, \quad (12)$$

де $V_{\text{гарм}}$ - амплітудна складова першої (основної) гармоніки.

Цей коефіцієнт показує, яку частку в загальній вібрації становить регулярна (детермінована) компонента.

3. Коефіцієнт шуму $c_{\text{ш}}^2$

$$c_{\text{ш}}^2 = \frac{V_{\text{ш}}^2}{V_{СКЗ}^2}, \quad (13)$$

де $V_{\text{ш}}^2$ - дисперсія шумової складової.

Цей параметр характеризує рівень випадкових коливань у сигналі (частку шумової енергії в загальній вібрації).

4. Ймовірність відмови (варіант I та II)

Ймовірність того, що віброшвидкість перевищить порогове значення V_n :

$$P_{\text{відм}} = \exp\left(-\frac{V_n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (14)$$

де σ - параметр розподілу Релея,

V_n - пороговий рівень (варіант I або II).

Варіанти I та II відповідають різним методам визначення порогу (наприклад, за другим моментом або за правилом «трьох сигм»).

5. Відношення «сигнал–шум»:

$$\gamma = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_{\text{ш}}^2}, \quad (15)$$

де σ_r^2 - дисперсія регулярної (гармонічної) складової,

$\sigma_{\text{ш}}^2$ - дисперсія шуму.

Відношення «сигнал–шум» є ключовим параметром для оцінки якості сигналу.

6. Коефіцієнт запасу міцності K

$$K = \frac{V_{\text{доп}}}{V_{СКЗ}}, \quad (16)$$

де $V_{\text{доп}}$ - допустиме (нормативне) значення віброшвидкості.

Варіанти I та II відповідають різним підходам до визначення $V_{\text{доп}}$.

7. Граничні значення віброшвидкості V

Це значення порогу, отримане за вибраним методом нормування:

Варіант I - більш консервативний (нижчі пороги).

Варіант II - менш консервативний (вищі пороги).

8. Нормативні значення віброшвидкості T

Це значення, встановлені заводськими або галузевими нормами, які використовують для порівняння з експлуатаційними даними.

Результати визначення граничних значень віброшвидкості корпусів підшипників газоперекачувального агрегату ГПА 10 наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Статистичні параметри віброшвидкості для контрольних точок агрегату ГПА-10

Table 1

Statistical parameters of vibration speed for control points of the GPA 10 unit

Параметр	Номер точки вимірювання				
	2	3*	4*	5	6*
Середньоквадратичне значення віброшвидкості парку ГПА $V_{СКЗ}$, мм/с	3,9	4,5	5,0	4,7	5,0
Коефіцієнт гармонік b , с/мм	0,120	0,118	0,114	0,117	0,111
Коефіцієнт шуму $c_{ш}^2$	0,008	0,010	0,011	0,010	0,012
Ймовірність відмови:					
- I варіант	0,13	0,15	0,16	0,15	0,17
- II варіант	0,10	0,12	0,13	0,12	0,14
Відношення «сигнал-шум» γ	15	13	12	13	11
Коефіцієнт запасу міцності K :					
- I варіант	2,73	2,85	2,93	2,89	2,92
- II варіант	3,00	3,15	3,23	3,18	3,22

Параметр	Номер точки вимірювання				
	2	3*	4*	5	6*
Граничні значення віброшвидкості $V_{доп}$, мм/с:					
- I варіант	11	11,5	12	11,7	12
- II варіант	13	13,5	14	13,7	14
Нормативні значення віброшвидкості [7, 8], мм/с	30	-	-	-	30

Проведена статистична обробка експлуатаційних даних для агрегатів типу ГПА-10 дозволила оцінити характер вібраційних процесів у різних контрольних точках. Середньоквадратичні значення віброшвидкості перебувають у межах 3,9...5,0 мм/с, що суттєво нижче за чинні нормативні значення $V_{доп} = 30$ мм/с. Це свідчить про значний запас міцності агрегатів за вібраційним критерієм.

Коефіцієнти гармонік b мають близькі значення у всіх точках (0,111-0,120), що вказує на стабільність регулярної складової сигналу та відсутність різких змін у динаміці ротора. Коефіцієнт шуму $c_{ш}^2$ перебуває в межах 0,008...0,012, що підтверджує низький рівень випадкових збурень і високу якість вимірювань.

Відношення «сигнал-шум» γ змінюється від 11 до 15, що відповідає домінуванню гармонічної складової над шумовою. Це узгоджується зі спектральними моделями, наведеними на рисунку 3, де основна енергія зосереджена

в околі першої гармоніки.

Ймовірності відмови для двох варіантів порогів становлять 0,10...0,17, що свідчить про те, що статистично обґрунтовані порогові $V_{доп}$ є значно нижчими за нормативні. Це підтверджується і розрахованими коефіцієнтами запасу міцності K , які для варіанта I становлять 2,7...2,93, а для варіанта II - 3,00...3,23. Таким чином, навіть при зниженні порогових значень у 2...3 рази агрегати залишаються у безпечному режимі роботи.

Аналіз показує, що статистично обґрунтовані порогові є нижчими за чинні нормативи, що свідчить про необхідність перегляду нормування з урахуванням реальних експлуатаційних умов.

Отримані результати демонструють, що застосування статистичних критеріїв дозволяє встановити більш реалістичні та обґрунтовані порогові рівні віброшвидкості, які краще відповідають фактичному стану обладнання та зменшують ризик хибних діагностичних рішень.

Висновки

У роботі виконано комплексний аналіз вібраційних процесів газоперекачувальних агрегатів на основі статистичних характеристик експлуатаційних даних та математичного моделювання. Показано, що випадкова складова віброшвидкості у нормальному технічному стані агрегатів адекватно описується законом Релея, що дозволяє застосовувати статистичні критерії для визначення порогових рівнів.

Введення порогового значення віброшвидкості $V_{\text{дод}}$ на основі другого моменту та правила «трьох сигм» забезпечує можливість кількісної оцінки ймовірностей хибних рішень. Застосування критерію Неймана-Пірсона дає змогу оптимізувати вибір порогу між гіпотезами «нормальний стан» та «дефект», мінімізуючи ризик пропуску небезпечного стану.

Спектральний аналіз підтвердив, що вібраційний сигнал агрегатів ГПА-10 формується поєднанням гармонічних та шумових складових, що узгоджується з отриманими моделями спектральної щільності. Результати статистичної обробки експлуатаційних даних показали, що фактичні рівні віброшвидкості значно нижчі за чинні нормативні значення, а статистично обґрунтовані пороги $V_{\text{дод}}$ є суттєво меншими за заводські норми.

Отримані результати свідчать про доцільність перегляду існуючих нормативів вібрації з урахуванням реальних

експлуатаційних характеристик та статистичної природи вібраційних процесів.

У подальшому представляє інтерес провести

- удосконалення математичних моделей вібраційних процесів з урахуванням нелінійних ефектів, зміни жорсткості опор, газодинамічних збурень та температурних впливів;

- розробку адаптивних порогових критеріїв, що автоматично змінюються залежно від режиму роботи агрегату та рівня шуму;

- поглиблений спектральний аналіз із застосуванням вейвлет-перетворень та методів високої роздільної здатності для раннього виявлення дефектів;

- створення цифрових двійників газоперекачувальних агрегатів для моделювання вібраційних процесів у реальному часі та прогнозування розвитку несправностей.

- розширення статистичної бази даних за рахунок різних типів агрегатів, умов експлуатації та додаткових точок вимірювання.

- розробку оновлених нормативів вібрації, гармонізованих із сучасними міжнародними стандартами серії ISO 20816 та їх національними аналогами.

- інтеграцію методів машинного навчання для автоматичної класифікації технічного стану агрегатів за вібраційними ознаками.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Комплексні обстеження надземного механічного технологічного обладнання компресорних станцій магістральних газопроводів СТП 320.30019801-2002. Офіц. вид. Київ : ДК «Укртрансгаз». 56 с.
2. ДСТУ 2389-94. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. [Чинний від 1994-03-17]. Вид. офіц. Київ, 1995. 11 с.
3. ДСТУ 3160-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик. Загальні вимоги. [Чинний від 1995-07-28]. Вид. офіц. Київ, 1995. 11 с.
4. ДСТУ 3161-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми вібрації. ДСТУ 3161-95. [Чинний від 1995-07-28]. Вид. офіц. Київ, 1995. 18 с.

5. Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Гулей О. Б. Аналіз проблем організації контролю технічного стану газотранспортного обладнання та напрямки їх вирішення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2022. Т. 33 (72), № 1. С. 182-188. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/27>
6. Прокопенко О. О., Антоненко Н. С., Гулей О. Б. Метод параметричної діагностики газоперекачувального обладнання компресорної станції. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Київ, 2022. Т. 33 (72), № 5. С. 222-227.
7. ДСТУ ISO 20816-1:2021. Вібрація механічна. Вимірювання та оцінювання вібрації машин. Ч. 1. Загальні настанови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 34 с.
8. ДСТУ ISO 20816-4:2021. Вібрація механічна. Оцінювання вібрації машин. Ч. 4. Газотурбінні установки. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 28 с.
9. Elbhah K., Sinha J. A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.07.001>
10. Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review / Bagri L., Tahiry K., Hraiba A., Touil A., Mousrij A. *Vibration*. 2024. № 7. Pp. 1013 - 1062. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>
11. Rotating Machinery Fault Diagnosis under Time-Varying Speed Conditions Based on Adaptive Identification of Order Structure / X. Yu, X. Chen, M. Du, Yang Yang Zhipeng Feng. *Processes*. 2024. № 12(4). Pp. 752. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12040752>
12. Bearing fault detection with vibration and acoustic signals: Comparison among different machine learning classification methods / Josué Pacheco-Chérrez, Jesús A. Fortoul-Díaz, Froylán Cortés-Santacruz, Luz María Alosa-Valerdi, David I. Ibarra-Zarate. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 139. Pp 106515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106515>
13. Statistical distribution measures based on amplitude normalization for wind turbine generator bearing condition monitoring under variable speed conditions / Guangyao Zhang, Yi Wang, Yi Qin, Baoping Tang. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2025. Vol. 228. Pp. 112464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112464>
14. Jablonski A., Bielecka M., Bielecki A. Unsupervised detection of rotary machine imbalance based on statistical signal properties. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2022. Vol. 167, Part A. Pp. 108497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108497>
15. Elsamanty M., Abdelkader I., Wael Saady Salman. Principal component analysis approach for detecting faults in rotary machines based on vibrational and electrical fused data. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 200. P. 110559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110559>
16. Jiaming Lia, Chenhui Zhenga, Zhi-Xin Yanga. Review of fault diagnosis for rotating machinery: Prior knowledge integration in data-driven methods benefits model interpretability and generalizability. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2026. Vol. 242. Pp. 113623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113623>
17. Data-statistical prognostics and health monitoring of small-scale hydrogen fueled gas turbines / Muhammad Baqir Hashmi, Amare Desalegn Fentaye, Mohammad Mansouri, Konstantinos G. Kyprianidis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025. Vol. 106. Pp. 96-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.437>
18. Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies / Mohammadjavad Soleimania, Fatemeh Negar Irania, Meysam Yadegara, Nader Meskin. *Applied Energy*. 2025. Vol. 401, Part C. Pp. 126801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126801>

Отримано: 06.04.2026 / Переглянуто: 08.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹PROKOPENKO O., Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: o.o.prokopenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6834-3056>

¹ANTONENKO N., Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: n.s.antonenko@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0879-1642>

²TUPA I., Candidate of Technical Sciences,
Deputy Director for Occupational Health, Safety and Training
e-mail: igortyupa9@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8705-9122>

¹KHALIMOV D.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0919-8232>

¹KHALIMOV P.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: remontkhalimov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6484-5872>

¹YURECHKO D., candidate for the second (master's) level of higher education
Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: yurechko.dima@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1389-6953>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
²*Utility company Kharkiv Thermal Networks*
11 Mefodiyevska St., Kharkiv,

STATISTICAL NORMALIZATION OF VIBRATION VELOCITY IN GAS COMPRESSOR UNITS BASED ON OPERATIONAL DATA ANALYSIS

This paper presents a novel approach to the normalization of overall vibration velocity levels in gas compressor units (GCUs) based on large-scale statistical analysis of operational data. Unlike traditional methods relying on fixed regulatory limits or empirical recommendations from international standards, the proposed methodology applies the Neyman-Pearson criterion to determine an optimal vibration threshold that minimizes the probability of incorrect diagnostic decisions.

Mathematical models of vibration velocity distribution are developed, incorporating both harmonic components and broadband noise. It is shown that, under real operating conditions, the vibration process can be effectively represented as a combination of Rayleigh distributions with different variances. Using experimental data from a fleet of 310 GCU-10 units, statistical parameters of vibration velocity were obtained, and threshold values were calculated using two approaches: the second-order moment of the distribution and the classical “three-sigma” rule.

The results demonstrate that existing vibration standards significantly exceed statistically justified limits, which may reduce equipment lifetime and increase the risk of failures. The proposed approach enables the development of scientifically grounded vibration norms for specific measurement points and enhances operational reliability without additional maintenance costs.

Keywords: vibration velocity, gas compressor unit, statistical normalization, Neyman-Pearson criterion, Rayleigh distribution, reliability, condition monitoring, spectral analysis.

In cites: Prokopenko O., Antonenko N., Tupa I., Khalimov D., Khalimov P., Yurechko D. (2026). Statistical Normalization of Vibration Velocity in Gas Compressor Units Based on Operational Data Analysis. *Engineering*, (37), 64-76. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-05> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Ukrtransgaz 2002, *Kompleksni obstezhennia nadzemnoho mekhanichnoho tekhnologichnoho obladnannia kompresornykh stantsii mahistralnykh hazoprovodiv STP 320.30019801-2002* [Comprehensive inspections of above-ground mechanical technological equipment of compressor stations of main gas pipelines.], Kyiv, 56 p.
2. Derzhavne kyivske konstruktorske biuro «Luch» 1995, DSTU 2389-94. Tekhnichne diahnostuvannia ta kontrol tekhnichnoho stanu. Terminy ta vyznachennia [Technical diagnostics and technical condition monitoring. Terms and definitions], Kyiv.
3. Derzhctandart Ukrainy 1995, DSTU 3160-95. Kompresorne obladnannia. Vyznachennia vibratsiinykh kharakterystyk. Zahalni vymohy [Compressor equipment. Determination of vibration characteristics. General requirements], Kyiv.
4. Derzhctandart Ukrainy 1995, DSTU 3161-95. Kompresorne obladnannia. Vyznachennia vibratsiinykh kharakterystyk vidtsentrovnykh kompresoriv ta normy vibratsii. DSTU 3161-95 [Compressor equipment. Determination of vibration characteristics of centrifugal compressors and vibration standards. DSTU 3161-95], Kyiv.
5. Prokopenko, OO, Antonenko, NS & Hulei, OB 2022, 'Analiz problem orhanizatsii kontroliu tekhnichnoho stanu hazotransportnoho obladnannia ta napriamky yikh vyrishennia' [Analysis of the problem of organizing control of the technical condition of gas transportation equipment and directions for their solution], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*, Vol. 33 (72), № 1, Pp. 182-188. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.1/27> (in Ukraine)
6. Prokopenko, OO, Antonenko, NS & Hulei, OB 2022, 'Metod parametrychnoi diahnostyky hazoperekachuvalnoho obladnannia kompresornoj stantsii' [Method of parametric diagnostics of gas transmission equipment of compressor stations], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: tekhnichni nauky*, Vol. 33 (72), № 5, Pp. 222-227.
7. Derzhctandart Ukrainy 2021, DSTU ISO 20816 1:2021. Vibratsiia mekhanichna. Vymiriuvannia ta otsiniuvannia vibratsii mashyn. Ch. 1. Zahalni nastanovy [Mechanical vibration. Measurement and control of machine vibrations. Ch. 1. General instructions], Kyiv.
8. Derzhctandart Ukrainy 2021, DSTU ISO 20816 4:2021. Vibratsiia mekhanichna. Otsiniuvannia vibratsii mashyn. Ch. 4. Hazoturbinni ustanovy [Mechanical vibration. Vibration measurement of machines. Ch. 4. Gas turbine installations], Kyiv.
9. Elbhah, K. & Sinha, J 2013, 'A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines', *Mechanical Systems and Signal Processing*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.07.001>
10. Bagri, L, Tahiry, K, Hraiba, A, Touil, A & Mousrij, A 2024, 'Vibration Signal Analysis for Intelligent Rotating Machinery Diagnosis and Prognosis: A Comprehensive Systematic Literature Review' *Vibration*, no 7, Pp. 1013 - 1062. DOI: <https://doi.org/10.3390/vibration7040054>
11. X. Yu, X. Chen, M. Du & Yang Yang Zhipeng Feng 2024, 'Rotating Machinery Fault Diagnosis under Time-Varying Speed Conditions Based on Adaptive Identification of Order Structure', *Processes*, no 12(4), Pp. 752. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr12040752>
12. Josué Pacheco-Chérrez, Jesús A. Fortoul-Díaz, Froylán Cortés-Santacruz, Luz María Alosa-Valerdi, David I. Ibarra-Zarate 2022, 'Bearing fault detection with vibration and acoustic signals: Comparison among different machine learning classification methods', *Engineering Failure Analysis*, Vol. 139, Pp 106515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106515>
13. Guangyao Zhang, Yi Wang, Yi Qin & Baoping Tang 2025, 'Statistical distribution measures based on amplitude normalization for wind turbine generator bearing condition monitoring under variable speed conditions', *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 228, Pp. 112464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.112464>
14. Jablonski, A, Bielecka, M & Bielecki, A 2022, 'Unsupervised detection of rotary machine imbalance based on statistical signal properties', *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 167, Part A, Pp. 108497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108497>
15. Elsamanty, M, Abdelkader, I & Wael Saady Salman 2023, 'Principal component analysis approach for detecting faults in rotary machines based on vibrational and electrical fused data, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 200, P. 110559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110559>

16. Jiaming Lia, Chenhui Zhenga & Zhi-Xin Yanga 2026, 'Review of fault diagnosis for rotating machinery: Prior knowledge integration in data-driven methods benefits model interpretability and generalizability', *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 242, Pp. 113623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2025.113623>
17. Muhammad Baqir Hashmi, Amare Desalegn Fentaye, Mohammad Mansouri & Konstantinos G. Kyprianidis 2025, 'Data-statistical prognostics and health monitoring of small-scale hydrogen fueled gas turbines', *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 106, Pp. 96-118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.437>
18. Mohammadjavad Soleimania, Fatemeh Negar Irania, Meysam Yadegara & Nader Meskin 2025, 'Comprehensive review of gas turbine fault diagnostic strategies', *Applied Energy*, Vol. 401, Part C, Pp. 126801. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126801>

Submission received: 04.06.2026/Revised: 05.08.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06>

УДК 691.175:620.1

¹**КАНЮК Г. І.**, доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>

¹**ЄПІК О. М.**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: oleksandrepik0@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4909-6431>

¹*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДІВ ЇХ ПІДВИЩЕННЯ

Статтю присвячено дослідженню питання оцінки якості теплоізоляційних матеріалів, які знайшли широке застосування в огорожувальних конструкціях промислових та житлових будівлях і спорудах. Показано, що в сучасних умовах зростання вимог до енергоефективності, довговічності, пожежної безпеки та екологічності, показники якості теплоізоляційних матеріалів повинні оцінюватися не лише за коефіцієнтом теплопровідності, а й за комплексом взаємопов'язаних показників. Встановлено, що основними показниками якості теплоізоляційних матеріалів є теплопровідність, термічний опір, густина, водопоглинання, паропроникність, міцність на стиск, стабільність властивостей у часі, вогнестійкість, екологічність і технологічність. Показано доцільність використання комплексного показника якості, що дає змогу одночасно враховувати декілька критеріїв якості та забезпечити коректне порівняння традиційних та інноваційних рішень удосконалення характеристик теплоізоляційних матеріалів.

Проаналізовано сучасні наукові праці, присвячені традиційним утеплювачам, біобазованим волокнистим матеріалам, аерогелям, вакуумним теплоізоляційним панелям, композитам із відходів, а також матеріалам із фазовим перетворенням. Встановлено, що підвищення якості теплоізоляційних матеріалів досягається трьома основними групами методів: модифікацією структури матеріалу, введенням функціональних добавок і вдосконаленням конструктивно-технологічних рішень. До найбільш результативних методів належать керування пористістю та розміром пор, гідрофобізація, антипіренова модифікація, армування волокнами, застосування аерогелевих та вакуумних компонентів, формування багатошарових і гібридних систем.

Показано, що кожен метод має не лише переваги, а й обмеження: наприклад, зменшення теплопровідності нерідко супроводжується зниженням механічної міцності, а підвищення вологостійкості може ускладнювати парообмін. Запропоновано систему формалізованого опису окремих і комплексного показників якості, яку можна застосовувати для порівняльного аналізу теплоізоляційних матеріалів на етапах проектування, вибору та експлуатації. Результати роботи можуть бути використані під час розроблення нових теплоізоляційних композитів, вибору ефективних утеплювачів для енергоефективних будівель і вдосконалення методик багатокритеріального оцінювання їх експлуатаційної придатності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплоізоляційні матеріали, показники якості, теплопровідність, водопоглинання, міцність, комплексний показник якості, аерогелі, вакуумні теплоізоляційні панелі, методи підвищення якості.

Як цитувати: Канюк Г. І., Єпик О. М. Аналіз показників якості теплоізоляційних матеріалів та методів їх підвищення. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 77-86. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06>



Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Підвищення енергоефективності будівель є одним із ключових напрямів сучасного будівельного матеріалознавства та інженерії огорожувальних конструкцій. Значна частка тепловтрат припадає саме на зовнішні стіни, покриття та інші елементи оболонки будівлі, тому якість теплоізоляційних матеріалів безпосередньо визначає рівень енергоспоживання, комфорт внутрішнього середовища, довговічність конструкцій і вартість експлуатації об'єкта.

Традиційно ефективність теплоізоляційних матеріалів оцінювали переважно за коефіцієнтом теплопровідності. Проте сучасні умови експлуатації висувають значно ширші вимоги. Матеріал повинен зберігати теплоізоляційні властивості впродовж тривалого часу, бути стійким до

дії вологи та температурних коливань, мати достатню механічну міцність, відповідати вимогам пожежної безпеки, не створювати додаткових екологічних ризиків та бути технологічним у монтажі. Отже, наукова проблема полягає у формуванні системного підходу до оцінювання якості теплоізоляційних матеріалів і вибору методів її підвищення за множиною критеріїв.

Практична значущість цієї проблеми пов'язана з необхідністю обґрунтованого вибору матеріалів для нових та модернізованих енергоефективних будівель, термомодернізації житлового фонду, зниження витрат на опалення й кондиціонування, а також підвищення надійності та безпечності експлуатації теплоізоляційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові публікації свідчать про перехід від аналізу теплопровідності до багатокритеріальної оцінки показників якості теплоізоляційних матеріалів. Аналіз досліджень показав, що перспективними напрямками удосконалення є використання натуральних волокон, перероблених матеріалів, аерогелів, вакуумних ізоляційних панелей та гібридних систем [1-5]. Крім мінімізації теплопровідності, увага приділяється поєднанню низької теплопровідності з вологостійкістю, довговічністю, пожежобезпекою та низьким вуглецевим слідом.

У працях, присвячених зовнішнім стіновим утеплювачам, показано, що фактичні теплофізичні параметри матеріалів можуть відрізнятися від декларованих, а процес старіння істотно впливає на довготривалий термічний опір [6, 10]. Біобазовані матеріали перспективні з точки зору промислового будівництва, однак мають підвищену гігроскопічність і значну чутливість до режимів вологісного навантаження [7-9]. Для утеплювачів, які мають волокнисту структуру на основі вовни, конопель, трав'яної сировини або деревного волокна, важливим показником є не тільки теплопровідність, а й водопоглинання (особливо короткочасне), коефіцієнт опору дифузії водяної пари та зміна

характеристик під дією полум'я (хімічна та механічна деградація) [7, 8].

Окремий напрямом досліджень є використання інноваційних матеріалів та покриття. Дослідження аерогелевих систем підтверджують їхню наднизьку теплопровідність, малу густину та високу теплоізоляційну ефективність, однак має місце проблема крихкості, вартості та складності масштабного виробництва [5, 11, 13]. Вакуумні теплоізоляційні панелі характеризуються високим термічним опором за малої товщини, але потребують контролю деградації вакууму та теплових містків у вузлах кріплення [3, 14]. Роботи щодо композитів із вторинної сировини та гібридних гіпсових сумішей показують можливість поєднання прийнятних теплофізичних характеристик із циркулярністю виробництва, хоча питання стабільності властивостей і вологостійкості залишаються актуальними [2, 12, 15].

Аналіз публікацій засвідчує, що подальший розвиток теплоізоляційних матеріалів пов'язаний із багато критеріальною оптимізацією їх структури та властивостей, а також із розробкою комплексних показників якості, які дають змогу враховувати суперечливий вплив окремих методів модифікації на експлуатаційні характеристики.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою статті є аналіз показників якості теплоізоляційних матеріалів, формалізація їх оцінювання на основі окремих показників та комплексного показника якості, а також систематизація методів підвищення показників якості з визначенням їх переваг і недоліків.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання:

- визначити основні показники якості

теплоізоляційних матеріалів;

- подати математичні залежності для оцінювання окремих показників;

- сформулювати рівняння комплексного показника якості;

- проаналізувати сучасні методи підвищення показників якості;

- узагальнити переваги та недоліки методів підвищення якості теплоізоляційних матеріалів.

Виклад основного матеріалу

1. Основні показники якості теплоізоляційних матеріалів

Якість теплоізоляційного матеріалу (рис. 1) доцільно оцінювати за сукупністю таких показників: коефіцієнт теплопровідності λ , термічний опір R , густина ρ ,

водопоглинання W , жаропроникність P , міцність на стиск σ_c , теплофізична стабільність $k_{ст}$, показник пожежної безпеки $k_{пб}$, довговічність τ , екологічність $k_{ек}$.

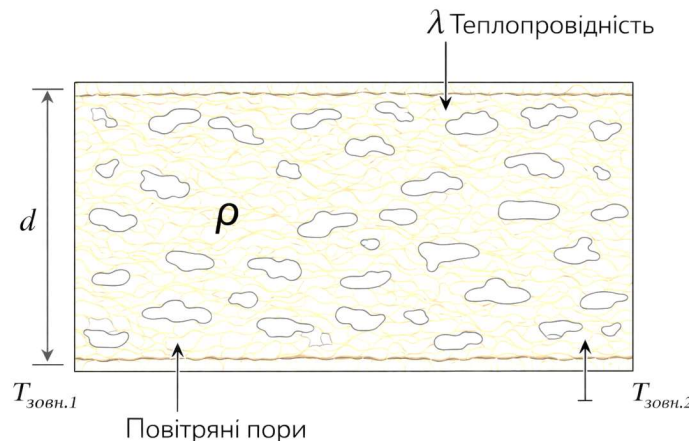


Рис. 1 – Переріз пористого теплоізоляційного матеріалу
Fig. 1 – Cross section of porous thermal insulation material

Запишемо показники якості більш детально:

1. Коефіцієнт теплопровідності визначається як:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{\Delta T}, \quad (1)$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²; δ – товщина шару матеріалу, м; ΔT – різниця температур на поверхнях матеріалу, К.

2. Термічний опір шару визначається як:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}, \quad (2)$$

де R – термічний опір, м²·К/Вт.

3. Об'ємна густина визначається як:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

де m – маса зразка, кг; V – об'єм зразка, м³.

4. Масове водопоглинання визначається як:

$$W = \frac{m_b - m_c}{m_c} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де m_b – маса зразка після зволоження, кг; m_c – маса сухого зразка, кг.

5. Міцність на стиск визначається як:

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}, \quad (5)$$

де F_{max} – максимальне стискальне навантаження, Н; A – площа навантаження, м².

6. Коефіцієнт термічної стабільності можна записати у вигляді:

$$k_{\text{ст}} = \frac{\lambda_0}{\lambda_t}, \quad (6)$$

де λ_0 – початковий коефіцієнт теплопровідності; λ_t – коефіцієнт теплопровідності після старіння або експлуатації протягом часу t . Якщо значення $k_{\text{ст}}$ близьке до одиниці, матеріал мало деградує в часі.

7. Показник вологостійкості у нормованому вигляді можна подати як:

$$k_{\text{вл}} = \frac{W_{\text{баз}}}{W}, \quad (7)$$

де $W_{\text{баз}}$ – базове або допустиме значення водопоглинання; W – фактичне водопоглинання.

8. Показник міцності визначається як:

$$k_{\text{м}} = \frac{\sigma_{\text{с}}}{\sigma_{\text{баз}}}, \quad (8)$$

де $\sigma_{\text{баз}}$ – базове або нормативне значення міцності.

9. Показник теплозахисної ефективності задається виразом:

$$k_{\text{т}} = \frac{\lambda_{\text{баз}}}{\lambda}, \quad (9)$$

де $\lambda_{\text{баз}}$ – базове значення теплопровідності для матеріалу порівняння.

10. Показник паропроникності можна подати як:

$$k_{\text{п}} = \frac{P}{P_{\text{баз}}}, \quad (10)$$

де P – фактичне значення паропроникності; $P_{\text{баз}}$ – базове або нормативне значення паропроникності.

11. Показник екологічності доцільно визначати як:

$$k_{\text{ек}} = \frac{E_{\text{баз}}}{E}, \quad (11)$$

де E – інтегральний показник екологічного впливу матеріалу; $E_{\text{баз}}$ – базове значення екологічного показника.

2. Комплексний показник якості

Для багатокритеріального оцінювання доцільно використовувати адитивний комплексний показник якості:

$$K_{\text{ком}} = w_1 k_{\text{т}} + w_2 k_{\text{м}} + w_3 k_{\text{вл}} + w_4 k_{\text{п}} + w_5 k_{\text{ст}} + w_6 k_{\text{пб}} + w_7 k_{\text{ек}}, \quad (12)$$

де $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7$ – вагові коефіцієнти значущості відповідних показників; $k_{\text{т}}$ – нормований показник теплозахисної ефективності; $k_{\text{м}}$ – нормований показник міцності; $k_{\text{вл}}$ – нормований показник вологостійкості; $k_{\text{п}}$ – нормований показник паропроникності; $k_{\text{ст}}$ – нормований показник стабільності властивостей; $k_{\text{пб}}$ – нормований показник пожежної

безпеки; $k_{\text{ек}}$ – нормований показник екологічності.

За умови нормування ваг виконується співвідношення:

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1. \quad (13)$$

Для задач, у яких низьке значення хоча б одного показника різко знижує загальну якість, доцільно застосовувати мультиплікативну форму:

$$K_{\text{ком}}^* = \prod_{i=1}^7 k_i^{w_i}. \quad (14)$$

Така форма жорсткіше враховує слабкі місця матеріалу, наприклад високе водопоглинання або низьку пожежну стійкість.

3. Аналіз методів підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів

Аналіз літературних джерел за напрямом якості теплоізоляційних матеріалів, дозволив зробити структуру

методів підвищення якості, яка показана на рис.2. Розглянемо детально деякі найбільш використовувані методи (табл.1-8):

Таблиця 1
Керування пористістю та мікроструктурою
Table 1
Porosity and microstructure control

Керування пористістю та мікроструктурою		
Сутність	Переваги	Недоліки
Формування оптимальної порової структури, за якої зменшуються твердофазна та конвективна складові теплопереносу	Зменшення λ ; можливість одержання легких матеріалів; підвищення питомого термічного опору	Надмірна пористість знижує σ_c ; відкриті пори підвищують водопоглинання; ускладнюється забезпечення стабільності структури

Таблиця 2
Гідрофобізація
Table 2
Hydrophobization

Гідрофобізація		
Сутність	Переваги	Недоліки
Застосування кремнійорганічних, силосанових, фторвмісних або воскових модифікаторів знижує капілярне всмоктування та сорбцію вологи	Зменшення W ; підвищення довговічності; стабілізація λ в умовах вологого середовища	Можливе зниження паропроникності; додаткові витрати; окремі гідрофобізатори можуть погіршувати пожежні характеристики.

Таблиця 3
Антипіренова модифікація
Table 3
Flame retardant modification

Антипіренова модифікація		
Сутність	Переваги	Недоліки
Введення антипіренів, мінеральних наповнювачів, спучувальних систем та негорючих оболонок підвищує пожежну безпеку матеріалу	Зменшення горючості; розширення сфер застосування; підвищення безпеки експлуатації	Можливе зростання густини; іноді погіршується екологічність; частина добавок знижує механічну цілісність композиту

Таблиця 4
Армування волокнами та використання зв'язувальних систем
Table 4
Fiber reinforcement and use of bonding systems

Армування волокнами та використання зв'язувальних систем		
Сутність	Переваги	Недоліки
Армування природними, мінеральними або синтетичними волокнами, а також добір полімерних і мінеральних зв'язувальних підвищує міцність матеріалу	Зростання σ_c та тріщиностійкості; поліпшення формостійкості; зниження усадки	Можливе зростання λ через ущільнення структури; технологічна складність; потреба в підборі сумісних компонентів

Таблиця 5
Застосування аерогелів
Table 5
Applications of Aerogels

Застосування аерогелів		
Сутність	Переваги	Недоліки
Використовуються аерогелі, які мають надзвичайно високу пористість і дуже низьку теплопровідність	Дуже низьке λ ; мала товщина теплоізоляційного шару; можливість створення високоефективних композитів	Висока вартість; крихкість; чутливість до технології виготовлення та монтажу

Таблиця 6
Вакуумні теплоізоляційні панелі
Table 6
Vacuum insulation panels

Вакуумні теплоізоляційні панелі		
Сутність	Переваги	Недоліки
Використання панелей, які забезпечують дуже високий термічний опір за мінімальної товщини	Максимальна теплозахисна ефективність; зменшення товщини огороження; доцільність для реконструкції обмежених за простором зон	Чутливість до проколів і пошкоджень; наявність теплових містків у крайових зонах; поступова деградація вакууму

Таблиця 7
Використання вторинної та біобазованої сировини
Table 7
Use of secondary and bio-based raw materials

Використання вторинної та біобазованої сировини		
Сутність	Переваги	Недоліки
До матеріалу вводять рослинні волокна, відходи текстилю, паперу, гіпсу, полімерів тощо	Екологічність; зниження вуглецевого сліду; розвиток циркулярної економіки	Вища варіабельність властивостей; чутливість до вологи та біодеградації; потреба в додатковому захисті

Таблиця 8
Багатошарові та гібридні системи
Table 8
Multilayer and hybrid systems

Багатошарові та гібридні системи		
Сутність	Переваги	Недоліки
Поєднання декількох матеріалів, зокрема відбивних шарів, пористих утеплювачів, РСМ-компонентів і захисних оболонок	Синергетичний ефект; можливість збалансувати суперечливі властивості; адаптація до конкретних умов експлуатації	Складність розрахунку і виробництва; проблеми сумісності шарів; вища собівартість

Аналіз показує, що універсального теплоізоляційного матеріалу, який одночасно мав би мінімальну теплопровідність, високу міцність, низьке водопоглинання, абсолютну пожежну безпеку, довговічність і низьку вартість, наразі не існує. Саме тому доцільно переходити від оцінювання одного домінуючого параметра до багатокритеріальної моделі якості.

Для житлового та громадського будівництва важливим є компроміс між теплозахистом, вологісним режимом та довговічністю. Для тонкошарових або реконструкційних рішень пріоритет може надаватися аерогелям і вакуумним панелям. Для екологічно орієнтованих об'єктів перспективни-

ми є біобазовані та вторинні композити, але за умови їх гідрофобного, біозахисного й вогнезахисного доопрацювання. Отже, вибір методу підвищення якості має визначатися функціональним призначенням конструкції, режимом експлуатації, економічними обмеженнями та вимогами нормативної безпеки.

Запропонований комплексний показник якості придатний для інженерного порівняння матеріалів, а також для постановки задач оптимізації складу й структури теплоізоляційних композитів. Його перевага полягає в тому, що він дає змогу врахувати суперечливий вплив модифікаційних заходів і вибрати рішення не за одним, а за сукупністю показників.

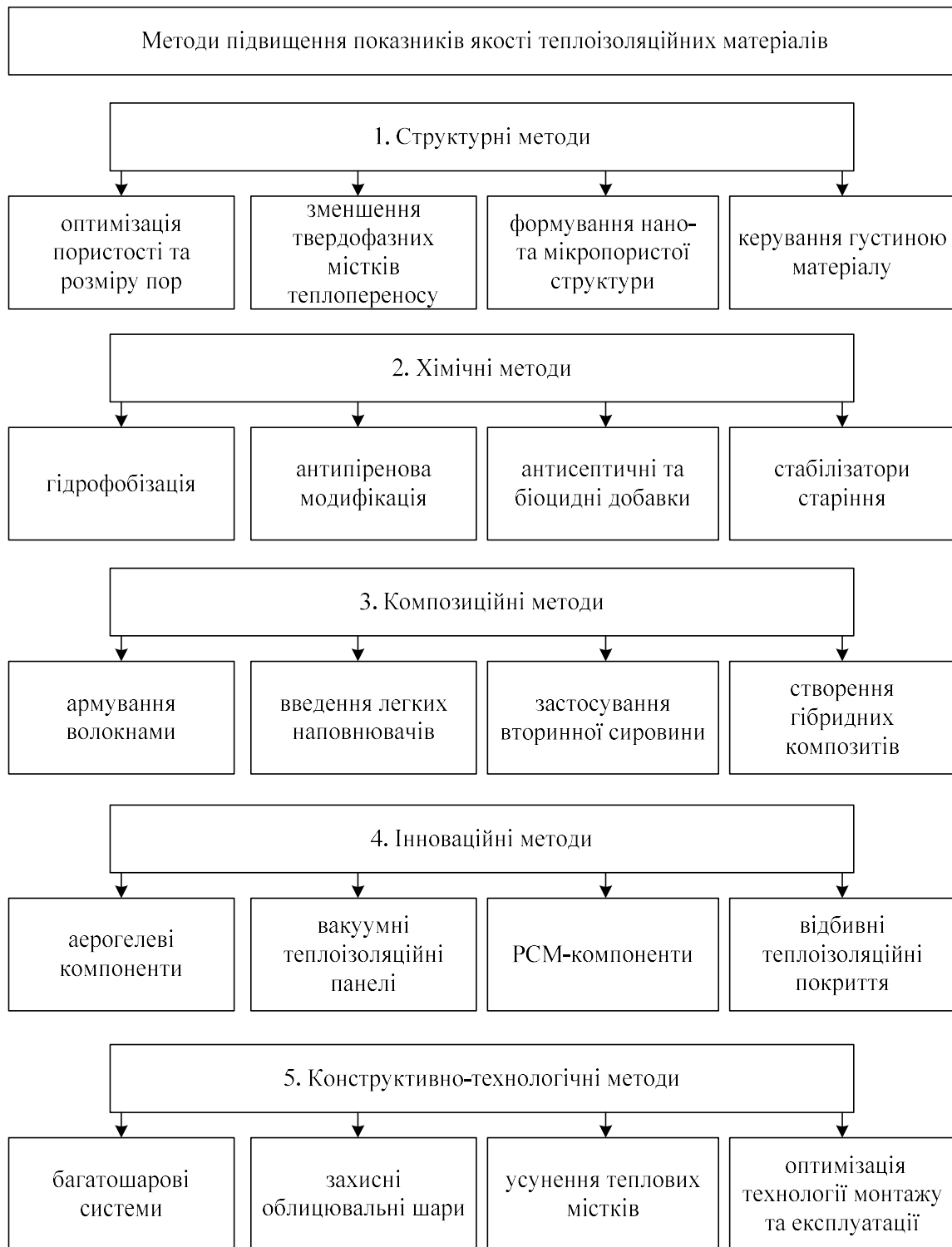


Рис. 2 – Структура методів підвищення показників якості теплоізоляційних матеріалів

Fig. 2 – Structure of methods for improving the quality of thermal insulation materials

Висновки

Якість теплоізоляційних матеріалів повинна оцінюватися за системою взаємопов'язаних показників, серед яких визначальними є теплопровідність, термічний опір, водопоглинання, паропроникність,

міцність, стабільність властивостей, пожежна безпека та екологічність.

Для кількісного аналізу доцільно використовувати як окремі показники якості, так і комплексний показник,

сформований на основі нормованих критеріїв і вагових коефіцієнтів значущості. Основними методами підвищення показників якості є керування пористою структурою, гідрофобізація, антипіренова модифікація, армування, використання аерогелевих і вакуумних компонентів, а також формування багатошарових і гібридних систем.

Кожен метод має як переваги, так і обмеження: зниження теплопровідності

часто супроводжується зменшенням міцності або зростанням вартості, тоді як підвищення вологостійкості та вогнестійкості може впливати на парообмін, масу чи екологічні характеристики.

Перспективним напрямом є створення гібридних теплоізоляційних матеріалів із багатофункціональними властивостями та застосування багатокритеріальної оптимізації їх складу й структури.

Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Список використаних джерел:

1. A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Sustainable Buildings / Ali A., Almutairi K., Alharthi M. et al. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. No. 20. Art. 8782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208782>.
2. A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources / Ouda M. et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 16. Art. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162876>.
3. Cuce P. M. Sustainable Insulation Technologies for Low-Carbon Buildings: From Past to Present. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 11. Art. 5176. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17115176>.
4. Cosentino L., Fernandes J., Mateus R. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 12. Art. 4676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124676>.
5. Lakatos Á. Novel Thermal Insulation Materials for Buildings. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 18. Art. 6713. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186713>.
6. Analysis of Thermal Properties of Materials Used to Insulate External Walls / Pomada M., Kieruzel K., Ujma A., Palutkiewicz P., Walasek T., Adamus J. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 19. Art. 4718. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194718>.
7. Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials from Sheep's Wool and Hemp Fibres / Vėjelis S., Vaitkus S., Kremensas A., Kairytė A., Sinkevičius V. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 13. Art. 3339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133339>.
8. Ranefjård O., Strandberg-de Bruijn P. B., Wadsö L. Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden. *Materials*. 2024. Vol. 17. No. 9. Art. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092021>.
9. Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes / Hoxha D., Ismail B., Rotaru A., Izabel D., Renaux T. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 17. Art. 10797. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710797>.
10. Kim J.-H., Kim S.-M., Kim J.-T. Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard. *Energies*. 2024. Vol. 17. No. 23. Art. 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105>.
11. Research on Thermal and Heat Insulation Properties of Aerogel Heat-Insulating Reflective Coatings / Liu Y. L. et al. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. No. 17. Art. 9700. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179700>.
12. Advancing the Circular Economy: Reusing Hybrid Bio-Waste-Based Gypsum for Sustainable Building Insulation / Liu Y. L. et al. *Buildings*. 2023. Vol. 13. No. 12. Art. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13122939>.
13. High-Strength, Thermal-Insulating, Fire-Safe Bio-Based Organic Lightweight Aerogel Based on 3D Network Construction of Natural Tubular Fibers / Xu Y., Yan C., Du C., Xu K., Li Y.,

Xu M., Bourbigot S., Fontaine G., Li B., Liu L. *Composites Part B: Engineering*. 2023. Vol. 261. Art. 110809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110809>.

14. Real-Time Service Life Estimation of Vacuum Insulated Panels via Embedded Sensing and Machine Learning Models / Ibadov N. et al. *Buildings*. 2025. Vol. 15. No. 16. Art. 2879. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162879>.

15. Determining Moisture Condition of External Thermal Insulation Composite Systems / Krause P. et al. *Materials*. 2025. Vol. 18. No. 3. Art. 614. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030614>.

Отримано: 28.03.2026 / Переглянуто: 30.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**G. KANJUK**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation, Metrology, and Energy-Efficient Technologies

e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1399-9039>

¹**O. EPIK**,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies

e-mail: oleksandrepik0@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4909-6431>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.*

ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF THERMAL INSULATION MATERIALS AND METHODS FOR THEIR IMPROVEMENT

The article examines modern approaches to assessing the quality of thermal insulation materials used in the enclosing structures of buildings and civil engineering works. It is shown that, under increasing requirements for energy efficiency, durability, fire safety, and environmental performance, thermal insulation should be assessed not only by its thermal conductivity coefficient, but also by a set of interrelated indicators. The key quality indicators include thermal conductivity, thermal resistance, density, water absorption, vapor permeability, compressive strength, stability of properties over time, fire resistance, environmental friendliness, and manufacturability. The expediency of using a comprehensive quality indicator is substantiated, since it makes it possible to simultaneously take several criteria into account and ensures a more accurate comparison of traditional and innovative thermal insulation materials.

Modern scientific publications devoted to conventional insulation materials, bio-based fibrous materials, aerogels, vacuum insulation panels, waste-based composites, as well as phase-change materials, are analyzed. It has been established that improving the quality of thermal insulation materials is achieved through three main groups of methods: modification of the material structure, introduction of functional additives, and improvement of design and technological solutions. The most effective methods include controlling porosity and pore size, hydrophobization, flame-retardant modification, fiber reinforcement, the use of aerogel and vacuum components, and the formation of multilayer and hybrid systems.

It is shown that each method has not only advantages but also limitations. For example, reducing thermal conductivity is often accompanied by a decrease in mechanical strength, while improving moisture resistance may complicate vapor exchange. A system for the formalized description of individual and comprehensive quality indicators is proposed, which can be applied to the comparative analysis of thermal insulation materials at the stages of design, selection, and operation. The results of the study can be used in the development of new thermal insulation composites, in the selection of effective insulation materials for energy-efficient buildings, and in improving methods for the multicriteria assessment of their operational suitability.

Keywords: thermal insulation materials, quality indicators, thermal conductivity, water absorption, strength, comprehensive quality indicator, aerogels, vacuum insulation panels, methods for quality improvement.

In cites: Kanjuk G., Epik O. (2026). Analysis of quality indicators of thermal insulation materials and methods for their improvement. *Engineering*, (37), 77-86. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-06> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

Reference:

1. Ali, A, Almutairi, K, Alharthi, M et al 2024, 'A Comprehensive Review and Recent Trends in Thermal Insulation Materials for Sustainable Buildings', *Sustainability*, Vol. 16, No. 20, Art. 8782. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16208782>.
2. Ouda, M. et al 2025, 'A Comprehensive Review of Sustainable Thermal and Acoustic Insulation Materials from Various Waste Sources', *Buildings*, Vol. 15, No. 16, Art. 2876. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162876>.
3. Cuce, PM 2-25, 'Sustainable Insulation Technologies for Low-Carbon Buildings: From Past to Present', *Sustainability*, Vol. 17, No. 11, Art. 5176. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17115176>.
4. Cosentino, L, Fernandes, J & Mateus, R 2023, 'A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials', *Energies*, Vol. 16, No. 12, Art. 4676. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124676>.
5. Lakatos, Á 2022, 'Novel Thermal Insulation Materials for Buildings', *Energies*, Vol. 15, No. 18, Art. 6713. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186713>.
6. Pomada, M, Kieruzel, K, Ujma, A, Palutkiewicz, P, Walasek, T & Adamus, J 2024, 'Analysis of Thermal Properties of Materials Used to Insulate External Walls', *Materials*, Vol. 17, No. 19, Art. 4718. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17194718>.
7. Vėjelis, S, Vaitkus, S, Kremensas, A, Kairytė, A & Sinkevičius, V 2024, 'Performance Evaluation of Thermal Insulation Materials from Sheep's Wool and Hemp Fibres', *Materials*, Vol. 17, No. 13, Art. 3339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17133339>.
8. Ranefjård, O, Strandberg-de Bruijn, PB & Wadsö, L 2024, 'Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden', *Materials*, Vol. 17, No. 9, Art. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17092021>.
9. Hoxha, D, Ismail, B, Rotaru, A, Izabel, D & Renaux, T 2022, 'Assessment of the Usability of Some Bio-Based Insulation Materials in Double-Skin Steel Envelopes', *Sustainability*, Vol. 14, No. 17, Art. 10797. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710797>.
10. Kim, J-H, Kim, S-M & Kim, J-T 2024, 'Comparison of Thermal Conductivity and Long-Term Change of Building Insulation Materials According to Accelerated Laboratory Test Methods of ISO 11561 and EN 13166 Standard', *Energies*, Vol. 17, No. 23, Art. 6105. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17236105>.
11. Liu, YL et al 2023, 'Research on Thermal and Heat Insulation Properties of Aerogel Heat-Insulating Reflective Coatings', *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 17, Art. 9700. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13179700>.
12. Balti, S, Boudenne, A, Belayachi, N, Dammak, L & Hamdi, N 2023, 'Advancing the Circular Economy: Reusing Hybrid Bio-Waste-Based Gypsum for Sustainable Building Insulation', *Buildings*, Vol. 13, No. 12, Art. 2939. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13122939>.
13. Xu, Y, Yan, C, Du, C, Xu, K, Li, Y, Xu, M, Bourbigot, S, Fontaine, G, Li, B & Liu, L 2023, 'High-Strength, Thermal-Insulating, Fire-Safe Bio-Based Organic Lightweight Aerogel Based on 3D Network Construction of Natural Tubular Fibers', *Composites Part B: Engineering*, Vol. 261, Art. 110809. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110809>.
14. Ibadov, N et al 2025, 'Real-Time Service Life Estimation of Vacuum Insulated Panels via Embedded Sensing and Machine Learning Models', *Buildings*, Vol. 15, No. 16, Art. 2879. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15162879>.
15. Krause, P et al 2025, 'Determining Moisture Condition of External Thermal Insulation Composite Systems', *Materials*, Vol. 18, No. 3, Art. 614. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18030614>.

Submission received: 03.28.2026/Revised: 04.30.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-07>

УДК 621.311.22:621.1:658.562

¹**А. Ю. МЕЗЕРЯ**, кандидат технічних наук

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>

¹**Т. М. ФУРЦОВА**, кандидат технічних наук

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7432>

¹**О. М. БЛИЗНИЧЕНКО**, кандидат технічних наук

доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: art-studio_diana_@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1654-1598>

¹**В. Є. МАЛЮТА**,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: sony199325@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0789-442X>

¹**О. Т. ТОЛСТОРЕБРОВ**,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: oleksandrtolstorebrov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3203-8909>

¹*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.*

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті розглянуто вплив показників якості основного енергетичного обладнання електростанцій на ефективність виробництва електричної та теплової енергії. Показано, що в сучасних умовах дефіциту маневрових потужностей, старіння енергоблоків, зростання вимог до паливної економічності, екологічної безпеки та гнучкості режимів роботи питання оцінювання якості енергетичного обладнання виходить за межі традиційного аналізу лише номінального ККД. Для турбін, котлів, конденсаторів, генераторів, систем регулювання та охолодження визначальними стають не тільки енергетичні, а й надійнісні, режимні, ресурсні та експлуатаційні характеристики. Обґрунтовано, що ефективність роботи енергетичного обладнання формується під впливом сукупності взаємопов'язаних показників, до яких належать коефіцієнт корисної дії, питома витрата палива, надійність, готовність, коефіцієнт використання встановленої потужності, рівень втрат у допоміжних системах, термодинамічна досконалість та стабільність параметрів у часі.

Проаналізовано сучасні дослідження, які присвячено деградації парових турбін, оптимізації горіння в котлах, впливу надлишку повітря на ефективність, ексергетичному розподілу втрат між основними вузлами теплових електростанцій, підвищенню ефективності турбоустановок у змінних режимах, вдосконаленню систем охолодження турбогенераторів, а також питанням надійності та безпечної експлуатації обладнання. Встановлено, що окремі показники якості мають кількісно відчутний вплив на результативність роботи. Зокрема, довготривала деградація парових турбін може зумовлювати втрату потужності на рівні (2-7,5)%; збільшення надлишку повітря в котлі від 10% до 70% спричиняє зниження енергетичної та ексергетичної ефективності приблизно на 5%; інтеграція термоакумуляційних систем і вдосконалення режимів роботи можуть збільшувати маневровість у 3-4 рази та підвищувати прибутковість електростанції. Для окремих турбоагрегатів раціоналізація температури проміжного перегріву забезпечувала приріст ККД на (0,3-1,5)% і зниження питомої витрати умовного палива на (3-4) г у.п./кВт·год.

Запропоновано систему окремих показників якості енергетичного обладнання та комплексний показник якості, придатний для багатокритеріального оцінювання. Показано, що найбільший вплив на інтегральну ефективність електростанцій справляють показники якості турбінного, котельного та конденсаційного обладнання, а також надійність генераторів і допоміжних систем. Результати можуть бути використані під час технічної діагностики, модернізації, оптимізації режимів роботи та обґрунтування пріоритетів ремонту й реконструкції енергетичного обладнання електростанцій.



КЛЮЧОВІ СЛОВА: енергетичне обладнання, електростанція, показники якості, ефективність роботи, ККД, питома витрата палива, надійність, готовність, турбіна, котел, генератор, комплексний показник якості.

Як цитувати: Мезеря А. Ю., Фурсова Т. М., Близниченко О. М., Малюта В. Є., Толсторебров О. Т. Аналіз впливу показників якості на ефективність роботи енергетичного обладнання електростанцій. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 87-96. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-07>

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Ефективність роботи електростанцій значною мірою визначається технічним станом і якістю основного енергетичного обладнання: котлів, турбін, турбогенераторів, конденсаторів, систем регулювання, підігрівачів, насосного та допоміжного обладнання. За умов старіння енергоблоків, частих змін навантаження, потреби в маневруванні та жорсткіших вимог до економічності навіть відносно невеликі відхилення окремих показників якості призводять до відчутного погіршення загальної ефективності станції. Для практики енергетики це означає зростання питомої витрати палива, втрат потужності,

кількості відмов, тривалості простоїв і вартості виробленої енергії.

Наукова проблема полягає у формалізації взаємозв'язку між показниками якості енергетичного обладнання та інтегральною ефективністю роботи електростанцій. Практична значущість цієї проблеми пов'язана з необхідністю обґрунтування пріоритетів модернізації, ремонту, режимної оптимізації та діагностування. Особливо актуальним є перехід від аналізу одиничних характеристик до багато критеріальної оцінки, яка враховує енергетичні, надійнісні, ресурсні та економічні аспекти функціонування обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях домінує підхід, за якого ефективність електростанції аналізується через якість роботи ключових елементів енергетичного тракту. Для паротурбінного обладнання доведено, що навіть за збереження загальної працездатності тривала експлуатація спричиняє помітне падіння потужності та ефективності. Зокрема, для турбін різної потужності втрати потужності внаслідок деградації становили (2-7,5)% [1]. Окремі українські дослідження показують, що вибір раціональних режимних параметрів, зокрема температури проміжного перегріву, може дати приріст ККД турбоустановки на (0,3–1,5)% і забезпечити економію палива на рівні (1-2)% [12, 13].

Для котельного обладнання велике значення мають повнота згоряння палива, коефіцієнт надлишку повітря, якість регулювання паливних пристроїв та стан поверхонь нагріву. У роботі [2] показано, що збільшення надлишку повітря з 10% до 70% знижує енергетичну й ексергетичну ефективність відповідно на 5,1% та 5,2%. У дослідженні [3] доведено, що вдосконалене

керування якістю горіння дозволяє одночасно покращувати паливну економічність та екологічні показники котла. Це узгоджується з результатами ексергетичного аналізу, згідно з якими саме котел робить найбільший внесок у втрати: до 59% енергетичних і близько 70% ексергетичних руйнувань у розглянутій тепловій електростанції [4].

Дослідження конденсаційного та регенеративного обладнання вказують, що його якість прямо впливає на втрати теплоти в циклі, вакуум у конденсаторі та кінцеву потужність турбіни. За даними [4], конденсатор відповідав за 5,33% енергетичних і близько 2% ексергетичних втрат, а зниження втрат у конденсаторі на українських енергоблоках супроводжувалося приростом ефективності турбоустановки [12]. Для когенераційних схем важливими стають показники гнучкості та оптимізації теплових відборів: у [5] енергетична ефективність модернізованої установки досягала 90,7%, ексергетична – 38,0%, а прибуток зростав на 8,1%.

Для електромеханічного обладнання акцент зміщується на втрати в генераторах, якість охолодження та точність моніторингу. У [6] показано, що додаткові внутрішні втрати в гідрогенераторах можуть становити близько 2% номінальних втрат, а втрати в сталі через технологічні чинники – до 4%; при цьому похибка вимірювальних систем може досягати 5%. У роботі [14] підкреслено, що надійність високопотужного турбогенератора істотно залежить від ефективності його системи охолодження. Окрему групу становлять дослідження, присвячені маневровості та резервуванню: інтеграція теплового нако-

пичення збільшувала діапазон навантаження з (30-100)% до (23,4-100)% та підвищувала максимальну швидкість зміни навантаження з 1,82% до $5,94\%P_n / \text{хв}$, а в іншому режимі – до $7,75\%P_n / \text{хв}$ [8]; для парових турбін доцільним визнано резерв на рівні 10% номінальної потужності [11]. Отже, сучасні дослідження підтверджують, що ефективність електростанції визначається узгодженою дією показників якості всіх ключових елементів енергетичного обладнання.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета статті полягає в аналізі впливу показників якості енергетичного обладнання електростанцій на ефективність їх роботи, формалізації окремих і комплексного показників якості та визначенні кількісних діапазонів впливу основних характеристик обладнання на техніко-економічні результати роботи станції.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- розробити структуру основних показників якості енергетичного обладнання електростанцій;

- визначити значення окремих показників якості та комплексного показника якості;

- встановити основні канали впливу показників якості на ефективність роботи електростанції;

- узагальнити чисельні значення впливу окремих показників за сучасними публікаціями;

- побудувати структуру впливу показників якості енергетичного обладнання на ефективність роботи обладнання.

Виклад основного матеріалу

1. Показники якості енергетичного обладнання

Для енергетичного обладнання електростанцій, спрощена технологічна схема якої показана на рис. 1, доцільно визначити такі основні показники якості:

- енергетична ефективність (ККД), η ;
- питома витрата палива, b ;
- коефіцієнт готовності, K_r ;

- імовірність безвідмовної роботи, $P(t)$;
- коефіцієнт використання встановленої потужності, $K_{вст}$;
- коефіцієнт технічного стану, $K_{тех}$;
- відносні втрати потужності, $\Delta N/N_n$;
- ексергетична ефективність, η_{ex} ;
- коефіцієнт маневровості, $K_{ман}$.

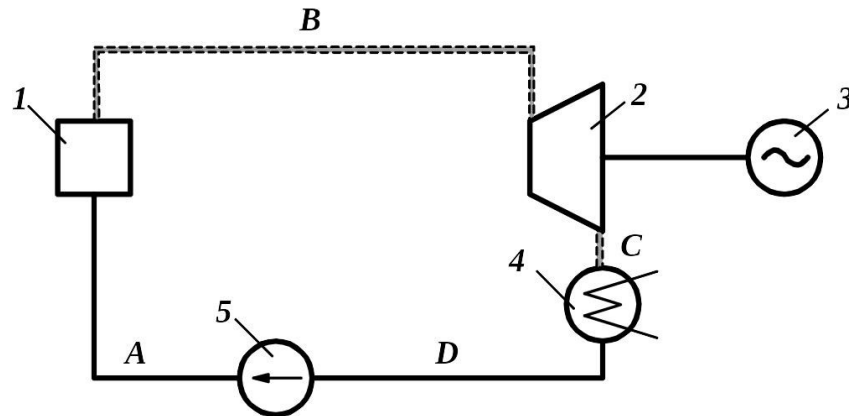


Рис. 1 – Технологічна схема теплової електростанції, яка працює за циклом Ренкіна: 1 – парогенератор (котел); 2 – турбіна; 3 – електричний генератор; 4 – конденсатор; 5 – насос; B, C – пара; A, D – конденсат

Fig. 1 – Technological scheme of a thermal power plant operating on the Rankine cycle: 1 – steam generator (boiler); 2 – turbine; 3 – electric generator; 4 – condenser; 5 – pump; B, C – steam; A, D – condensate

Електростанційна ефективність залежить як від окремих значень цих показників для вузлів, так і від їх сукупної узгодженості.

Загальний коефіцієнт корисної дії енергетичного обладнання або енергоблока:

$$\eta = \frac{N_{\text{вих}}}{N_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

де $N_{\text{вих}}$ – корисна потужність або корисний енергетичний потік; $N_{\text{вх}}$ – підведена потужність або енергія палива.

Для теплового енергоблока зручним є запис через теплоту палива:

$$\eta_e = \frac{P_e}{BQ_n}, \quad (2)$$

де P_e – електрична потужність блока; B – витрата палива; Q_n – нижча теплота згорання палива.

Питома витрата палива:

$$b = \frac{B}{E}, \quad (3)$$

де B – витрата палива за розрахунковий інтервал; E – виробіток електроенергії.

Коефіцієнт готовності:

$$K_r = \frac{T_p}{T_p + T_v}, \quad (4)$$

де T_p – час працездатного стану; T_v – час ремонту або відновлення.

Імовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

де λ – інтенсивність відмов; t – час роботи.

Ексергетична ефективність:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{Ex_{\text{кор}}}{Ex_{\text{під}}}, \quad (6)$$

де $Ex_{\text{кор}}$ – корисна ексергія; $Ex_{\text{під}}$ – підведена ексергія.

Відносні втрати потужності внаслідок погіршення якості обладнання:

$$\delta_N = \frac{N_n - N_{\text{ф}}}{N_n} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де N_n – номінальна потужність; $N_{\text{ф}}$ – фактична потужність.

Коефіцієнт використання встановленої потужності:

$$K_{\text{вст}} = \frac{E}{N_{\text{вст}} T}, \quad (8)$$

де $N_{\text{вст}}$ – встановлена потужність; T – календарний час.

Коефіцієнт технічного стану можна подати нормованою сумою:

$$K_{\text{тех}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_i, \quad (9)$$

де α_i – вагові коефіцієнти; k_i – нормовані часткові показники стану вузлів.

Для інтегральної оцінки якості енергетичного обладнання пропонується використовувати комплексний показник:

$$K_k = w_1 k_{\eta} + w_2 k_b + w_3 k_r + w_4 k_p + w_5 k_{\text{тех}} + w_6 k_{\text{ex}} + w_7 k_{\text{ман}}, \quad (10)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, для яких виконується умова $\sum_{i=1}^7 w_i = 1$, k_{η} – нормований показник ККД; k_b – нормований показник питомої витрати палива; k_r – нормований показник готовності; k_p – нормований показник безвідмовності; $k_{\text{тех}}$ – нормований показник технічного стану; k_{ex} – нормований показник ексергетичної ефективності; $k_{\text{ман}}$ – нормований показник маневровості.

2. Аналіз впливу показників якості на ефективність роботи

З аналізу наукових публікацій, можна зробити такий висновок, щодо впливу показників якості на ефективність роботи енергетичного обладнання електростанцій.

Для турбінного обладнання ключовими є η , η_i , вібраційний стан, температура проміжного перегріву та якість регулювання режимів. За даними довготривалої експлуатації, деградація парових турбін призводила до втрати потужності (2-7,5)%, що прямо знижує відпуск електроенергії та підвищує умовно-постійну складову собівартості. Для українських енергоблоків встановлено, що раціональне зниження температури вторинної пари від 545°C до 535°C може підвищити ККД турбоустановки приблизно на 0,6%, а в окремих когенераційних режимах – більш ніж на 1,5%. Одночасно фіксується зниження питомої витрати умовного палива на (3-4) г у.п./кВт·год.

Для котельного обладнання вирішальний вплив мають якість спалювання палива, коефіцієнт надлишку повітря, стан поверхонь нагріву та якість автоматичного регулювання. Підвищення надлишку повітря від 10% до 70% зменшує енергетичну ефективність на 5%. Водночас сучасні системи керування якістю горіння дозволяють зменшувати теплові втрати через надмірний кисень та неповне згоряння, тобто утримувати котел ближче до оптимальної області роботи. Ексергетичний аналіз реальної теплової електростанції показав, що котел формує до 59% і близько 70% ексергетичних втрат, тому саме покращення якості котельного обладнання забезпечує найбільший резерв підвищення загальної ефективності станції.

Конденсаційне та регенеративне обладнання впливає на ефективність через вакуум, кінцевий тиск у турбіні, втрати в конденсаторі та ступінь регенерації. За літературними даними, конденсатор у дослідженій станції відповідав за 5% енергетичних втрат і близько 2% ексергетичних руйнувань, а зниження втрат у конденсаторі на українських турбоуста-

новках супроводжувалося приростом ККД і корисної потужності. Це підтверджує, що якість теплообміну та стан конденсаційного обладнання мають менший абсолютний внесок, ніж котел, але дуже відчутний вплив на результат у часткових режимах навантаження.

Для генераторів та турбогенераторів ключовими є електричний ККД, втрати в обмотках і сталі, якість охолодження, точність діагностики та режимна стабільність. Для гідрогенераторів додаткові циркуляційні втрати можуть становити близько 2% номінальних втрат, а технологічно зумовлене зростання втрат у сталі – до 4%. Це не є великими величинами окремо, однак для машин великої потужності вони перетворюються на суттєві абсолютні втрати енергії та нагрів. Якість вимірювальної системи при цьому може вносити помилки до 5%, що робить точність контролю самостійним фактором ефективності. Для турбогенератора 325 МВт окремо підкреслюється критична роль системи охолодження для забезпечення безвідмовності та стабільного теплового режиму.

Для маневровості та режимної якості енергоблоків важливі резерв потужності, швидкість зміни навантаження та гнучкість теплової схеми. Інтеграція системи накопичення теплоти на вугільній ТЕС збільшувала діапазон навантаження з (30-100)% до (23,4-100)%, швидкість розвантаження – з 1,82% до 5,94 P_n /хв, а швидкість набору навантаження – з 1,79% до 7,75% P_n /хв

Для 350-МВт надкритичного блока оптимізація верхньої турбіни високого тиску може підвищити ефективність генерування з 30,6% до 35,2%. В українських роботах додатково показано, що резерв у 10% номінальної потужності парових турбін є доцільним з позицій стійкості та якості електропостачання.

Загальний вплив показників якості на ефективність роботи енергообладнання електростанцій можна представити так, як показано на рис. 2.



Рис. 2 – Структура показників якості енергетичного обладнання та їх вплив на ефективність роботи електростанції

Fig. 2 – Structure of quality indicators of power equipment and their impact on the efficiency of power plant operation

Проведений аналіз показує, що найбільший системний вплив на ефективність електростанції мають показники якості котла, турбіни та конденсаційного тракту. Котельне обладнання визначає основну частку термодинамічних втрат, турбіна – величину корисної потужності та чутливість до режимної деградації, а конденсатор – втрати в кінцевій частині циклу. Генератор і його система охолодження рідше формують найбільші питомі енергетичні втрати, проте саме їхній стан суттєво впливає на надійність і допустиме теплове навантаження машини.

Чисельні результати свідчать, що

навіть порівняно невеликі поліпшення окремих показників якості дають економічно відчутний ефект. Приріст ККД турбоустановки на (0,3-1,5)%, зниження питомої витрати палива на (3-4) г у.п./кВт·год або приріст ефективності блоку з 30,6% до 35,2%% уже змінюють паливний баланс і режимну цінність енергоблока. Одночасно погіршення якості – наприклад, через деградацію турбіни чи неоптимальний надлишок повітря – призводить до втрати потужності до 7,5%% та падіння ефективності на 5%. Це підтверджує доцільність використання саме комплексного показника якості, а не контролю одного-двох параметрів.

Висновки

Ефективність роботи електростанцій істотно залежить від системи показників якості енергетичного обладнання, а не лише від номінального ККД окремих агрегатів.

Найбільший вплив на інтегральну ефективність мають показники якості котла, турбіни, конденсатора, генератора та допоміжних систем охолодження й регулювання.

Деградація турбін зумовлює значні втрати потужності, неоптимальний коефіцієнт надлишку повітря – викликає

помітне зниження енергетичної та ексергетичної ефективності.

Для генераторного обладнання істотними є додаткові втрати та якість охолодження, що прямо впливає на ефективність та надійність машин великої потужності.

Доцільним є використання комплексного показника якості K_k , який дає змогу поєднати енергетичні, надійнісні, режимні та технічні характеристики обладнання в єдиній моделі оцінювання.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Assessment of steam turbine performance degradation in long-term operation / Dosa I., Gavriluic I., Costea M., Neagoe M., Popescu C. *Energy*. 2025. Vol. 327. 136491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136491>.
2. Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler / Wang Y., Wang C., Zhang H. et al. *Energy*. 2022. Vol. 261. Art. 125274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125128>
3. Artificial Intelligence-Driven Approach to Optimizing Boiler Power Generation Efficiency: The Advanced Boiler Combustion Control Model / Lee K. J. et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 4. Art. 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18040820>.
4. Gungor Celik A. Energy, Exergy Analysis and Sustainability Assessment of a Thermal Power Plant Operating in Various Environmental Conditions Using Real Operational Data. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, No. 4. Art. 1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041417>
5. Operation Optimization of a Combined Heat and Power Plant Integrated with Flexibility Retrofits in the Electricity Market / Chen H. et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 13. Art. 3583. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18133583>.
6. Study on Determining the Efficiency of a High-Power Hydrogenerator Using the Calorimetric Method / Spunei E. et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 18. Art. 4813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18184813>.
7. Improving the Fuel Combustion Quality Control System in Medium Power Boilers / Janta-Lipińska S. et al. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 12. Art. 3055. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17123055>.
8. Dynamic performance of a power plant integrating with molten salt thermal energy storage / Wang C. et al. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 262. 1 March 2025. Article 125223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125223>
9. Assessment of Power Equipment Operational Safety in the Sustainable Management of Residual Lifespan / H. Hrinchenko, N. Antonenko, V. Khomenko, S. Artiukh. *Economics Ecology Socium*. 2024. Vol. 8, No. 3. P. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.61954/2616-7107/2024.8.3-7>.
10. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л., Болотний М. П. Аналіз режимної надійності при плануванні сталого розвитку енергосистеми. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3. С. 38–46. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).46-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).46-58)
11. Development of the model and improvement of the method of automated control of steam turbine parameters to minimize the power imbalance in the energy system to increase its efficiency /

Kryvda V. et al. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Vol. 6, No. 1(80). P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314219>

12 Tarelin A. O. Rational mode parameters of power units with steam turbines under partial loads. *Проблеми машинобудування*. 2024. Vol. 27. No. 1. pp. 35–45.. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2024.01.035>

13. Мазур А. О. Аналіз теплофікаційної паротурбінної установки ТЕЦ за енергетичними та ексергетичними показниками. *Проблеми машинобудування*. 2025. Вип. 28. №. 2. С. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.02.017> .

14. Шестак В., Внгель В., Шевченко О. Підвищення ефективності системи охолодження турбогенератора шляхом використання в газоохолоджувачі оребрених трубок. *Проблеми машинобудування*. 2025. Т. 28, № 3. С. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.03.034> .

15. Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system / Yavorskyi O., Tarakhtii O., Zhukovskyi V., Panin V. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Vol. 6, No. 2(80). P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.320229> .

Отримано: 19.03.2026 / Переглянуто: 21.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**A. MEZERYA**, Candidate of Technical Sciences

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2946-9593>

¹**T. FURSOVA**, Candidate of Technical Sciences

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1900-7432>

¹**O. BLIZNICHENKO**, Candidate of Technical Sciences

Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: art-studio_diana_@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1654-1598>

¹**V. MALIUTA**, Postgraduate student

Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: sony199325@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0789-442X>

¹**O. TOLSTOREBROV**, Postgraduate student

Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: oleksandrtolstorebrov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3203-8909>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.*

ANALYSIS OF THE IMPACT OF QUALITY INDICATORS ON THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF POWER PLANT ENERGY EQUIPMENT

The article examines the influence of quality indicators of the main power plant energy equipment on the efficiency of electric and thermal energy production. It is shown that under current conditions of limited flexible generation capacity, aging power units, and increasing requirements for fuel economy, environmental safety, and operational flexibility, the assessment of energy equipment quality extends beyond the traditional analysis of nominal efficiency alone. For turbines, boilers, condensers, generators, control systems, and cooling systems, not only energy-related characteristics but also reliability, operational, lifetime, and maintenance characteristics become decisive. It is substantiated that the operational efficiency of energy equipment is formed under the influence of a set of interrelated indicators, including efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, capacity factor, the level of losses in auxiliary systems, thermodynamic perfection, and the stability of parameters over time.

Modern studies devoted to steam turbine degradation, combustion optimization in boilers, the effect of excess air on efficiency, the exergetic distribution of losses among the main units of thermal power plants, increasing the efficiency of turbine installations under variable operating modes, improving turbogenerator cooling systems, as well as issues of equipment reliability and safe operation, are analyzed. It has been

established that individual quality indicators have a quantitatively significant influence on operating performance. In particular, long-term degradation of steam turbines may cause a power loss at the level of (2-7,5)%; an increase in excess air in the boiler from 10% to 70% leads to a decrease in energy and exergetic efficiency by approximately 5%; the integration of thermal energy storage systems and the improvement of operating modes can increase maneuverability by 3-4 times and improve the profitability of a power plant. For certain turbine units, rationalization of the reheated steam temperature provided an increase in efficiency of (0,3-1,5)% and a reduction in specific equivalent fuel consumption by (3-4) g standard fuel/kWh.

A system of individual quality indicators of power equipment and a comprehensive quality indicator suitable for multicriteria assessment is proposed. It is shown that the greatest impact on the integrated efficiency of power plants is exerted by the quality indicators of turbine, boiler, and condensing equipment, as well as the reliability of generators and auxiliary systems. The results can be used in technical diagnostics, modernization, optimization of operating modes, and substantiation of priorities for repair and reconstruction of power plant energy equipment.

Keywords: energy equipment, power plant, quality indicators, operational efficiency, efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, turbine, boiler, generator, comprehensive quality indicator.

In cites: Mezerya A., Fursova T., Bliznichenko O., Maliuta V., Tolstorebrov O. (2026). Analysis of the impact of quality indicators on the operational efficiency of power plant energy equipment. *Engineering*, (37), 87-96. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-07> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Reference:

1. Dosa, I, Gavriluc, I, Costea, M, Neagoe, M & Popescu, C 2025, 'Assessment of steam turbine performance degradation in long-term operation', *Energy*, Vol. 327, 136491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136491> .
2. Wang, Y, Wang, C, Zhang, H et al 2022, 'Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler', *Energy*, Vol. 261, Art. 125274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125128>
3. Lee, KJ et al 2025, 'Artificial Intelligence-Driven Approach to Optimizing Boiler Power Generation Efficiency: The Advanced Boiler Combustion Control Model', *Energies*, Vol. 18, No. 4, Art. 820. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18040820> .
4. Gungor Celik A 2025, 'Energy, Exergy Analysis and Sustainability Assessment of a Thermal Power Plant Operating in Various Environmental Conditions Using Real Operational Data', *Sustainability*, Vol. 17, No. 4, Art. 1417. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17041417>
5. Chen, H et al 2025, 'Operation Optimization of a Combined Heat and Power Plant Integrated with Flexibility Retrofits in the Electricity Market' *Energies*, Vol. 18, No. 13, Art. 3583. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18133583> .
6. Spunei, E et al 2025, 'Study on Determining the Efficiency of a High-Power Hydrogenerator Using the Calorimetric Method', *Energies*, Vol. 18, No. 18, Art. 4813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18184813> .
7. Janta-Lipińska, S et al 2024, 'Improving the Fuel Combustion Quality Control System in Medium Power Boilers', *Energies*, Vol. 17, No. 12, Art. 3055. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17123055> .
8. Wang, C 2025, 'Dynamic performance of a power plant integrating with molten salt thermal energy storage', *Applied Thermal Engineering*, Vol. 262, Article 125223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125223>
9. Hrinchenko, H, Antonenko, N, Khomenko, V & Artiukh, S 2024, 'Assessment of Power Equipment Operational Safety in the Sustainable Management of Residual Lifespan', *Economics Ecology Socium*, Vol. 8, No. 3, Pp. 78–91. DOI: <https://doi.org/10.61954/2616-7107/2024.8.3-7> (in Ukraine)

10. Bardyk, YeI, Bondarenko, OL & Bolotnyi, MP 2024, 'Analiz rezhymnoi nadiinosti pry planuvanni staloho rozvytku enerhosystemy' [Operational Reliability Analysis for Sustainable Energy System Planning Development], *Vidnovlyuvana energetika*, № 3, Pp. 38–46. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).46-58](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).46-58) (in Ukraine)
11. Kryvda, V et al 2024, 'Development of the model and improvement of the method of automated control of steam turbine parameters to minimize the power imbalance in the energy system to increase its efficiency', *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 6, No. 1(80), Pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.314219> (in Ukraine)
12. Tarelin, AO 2024, 'Rational mode parameters of power units with steam turbines under partial loads', *Problemy mashynobuduvannia*, Vol. 27, No. 1, Pp. 35–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2024.01.035> (in Ukraine)
13. Mazur, AO 2025, 'Analiz teplofikacijnoyi paroturbinnoyi ustanovki TEC za energetichnimi ta eksergetichnimi pokaznikami' [Analysis of the thermal steam turbine plant of the CHP according to energy and exergy indicators.], *Problemy mashynobuduvannia*, Vol. 28, №. 2, Pp. 17–26. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.02.017> (in Ukraine)
14. Shestak, V, Vnhel, V & Shevchenko, O 2025, 'Pidvyshchennia efektyvnosti systemy okholodzhennia turbogeneratora shliakhom vykorystannia v hazookholodzhuvachi orebrenykh trubok' [Increasing the efficiency of the turbogenerator cooling system by using finned tubes in the gas cooler.], *Problemy mashynobuduvannia*, Vol. 28, no 3, Pp. 34–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.03.034> (in Ukraine)
15. Yavorskyi, O, Tarakhtii, O, Zhukovskyi, V & Panin, V 2024, 'Analysis of the distribution of gas turbine unit operation modes as a tool for improving the stability of the power system', *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 6, No. 2(80), Pp. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.320229> (in Ukraine)

Submission received: 03.19.2026/Revised: 04.21.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08>

УДК 621.311.1:621.314.1:006.05

¹Є. П. КЛЮЧКА,

асистент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kluchka1992@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1020-9719>

¹В. С. ВІТЕР,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3882-4675>

¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО ЇХ ПІДВИЩЕННЯ НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ ТРАДИЦІЙНОГО ТА ПОНОВЛЮВАЛЬНОГО ТИПІВ

У статті розглянуто показники якості електроенергії та нормативну базу, яка визначає вимоги до їх контролю і поліпшення на електростанціях традиційного та поновлювального типів. Вихідною передумовою є те, що зміна структури генерації не просто збільшує кількість джерел у мережі, а змінює сам характер відхилень: для синхронних енергоблоків типовими залишаються задачі підтримання частоти, напруги, реактивної потужності та стійкості режимів, тоді як для вітрових і сонячних електростанцій, особливо при інверторному приєднанні, зростає значення гармонік, інтергармонік, небалансу, швидких змін напруги та флікера. Показано, що оцінювання якості електроенергії не може зводитися до одного узагальненого показника, оскільки різні групи показників відображають різні механізми погіршення режиму й вимагають різних технічних рішень. У роботі систематизовано базові показники якості електроенергії – відхилення напруги та частоти, коефіцієнти гармонічних спотворень, показники небалансу й флікера. Окрему увагу приділено чинним документам, що формують нормативне поле в Україні: ДСТУ EN 50160:2023, ДСТУ EN 61000-4-30:2022, ДСТУ EN 61000-2-2:2022, ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022, галузевим СОУ НЕК та регуляторним матеріалам НКРЕКП. Показано, що існуюча нормативна база має проблему розшарування вимог між характеристиками якості, методами вимірювання, рівнями сумісності, випробуваннями стійкості обладнання та галузевими процедурами моніторингу. Виявлено також ознаки методичної неузгодженості між окремими чинними та довідковими матеріалами. На цій підставі запропоновано напрями удосконалення нормативного забезпечення: гармонізацію регуляторних і технічних документів, запровадження безперервного моніторингу на вузлах генерації, окреме нормування для інверторно-приєднаних джерел, а також поєднання вимог до якості електроенергії з підходами до цифрового обліку. Такий підхід дає змогу розглядати підвищення якості електроенергії не як локальне виправлення окремих відхилень, а як системну задачу проектування, експлуатації та регулювання режимів електростанцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: енергетичне обладнання, електростанція, показники якості, ефективність роботи, ККД, питома витрата палива, надійність, готовність, турбіна, котел, генератор, комплексний показник якості.

Як цитувати: Ключка Є. П., Вітер В. С. Аналіз показників якості електроенергії та нормативного забезпечення щодо їх підвищення на електростанціях традиційного та поновлювального типів. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 97-105. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08>



Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Якість електроенергії на електростанції формується не лише в точці приєднання до мережі, а й усередині власної схеми електропостачання, у системах збудження, перетворювачах, вузлах компенсації реактивної потужності, трансформаторах та алгоритмах керування генерацією. Для традиційних станцій критичними залишаються точність підтримання частоти й напруги, стійкість при зміні навантаження, комутаційні режими та вплив потужних електроприймачів власних потреб. Для поновлювальних електростанцій спектр проблем зміщується в бік гармонічних спотворень, швидких змін напруги, небалансу, взаємодії

інверторів із “слабкими” мережами та залежності показників якості від режимів керування. Через це одна й та сама нормативна вимога може по-різному реалізовуватися на тепловій, гідравлічній, вітровій чи сонячній електростанції. Наукове завдання полягає у поєднанні метрологічно коректного опису показників якості з аналізом придатності чинного нормативного поля до нової структури генерації. Практичне значення такої постановки пов'язане з вибором засобів моніторингу, фільтрації, компенсації, налаштування регуляторів та підготовкою вимог до модернізації електростанцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях останнього часу простежується перехід від опису окремих відхилень напруги до системного аналізу якості електроенергії в мережах із високою часткою перетворювальної генерації. Так, в роботі [1] авторами доведено, що для мереж, інтегрованих з офшорною вітрогенерацією, набір релевантних подій уже не обмежується усталеними гармоніками чи провалами напруги; на перший план виходять поєднані режими, в яких якість електроенергії, електромагнітна сумісність і алгоритми моніторингу мають розглядатися разом. Публікації [2, 3] підтверджують це на польових даних: вплив вітроустановок виявляється локально, залежить від жорсткості мережі та режимів комутації, а допустимість середніх значень не виключає небажаного впливу на чутливі навантаження.

Окремий напрям становлять дослідження засобів активного керування режимом. У роботі [4] узагальнено сучасні стратегії автоматичного керування реактивною потужністю залежно від напруги для мереж із великим вкладом відновлювальних джерел енергії (ВДЕ); показано, що локального регулювання напруги вже недостатньо без координації інверторів, накопичувачів енергії та засобів компенсації. Автори [5] систематизували типові проблеми розподіленої генерації: гармоніки, флікери, небаланс, коливання напруги та пов'язані з ними засоби покращення. В якості технічної бази

підвищення якості електроенергії розглядаються активні силові фільтри [6], а інші дослідження [7] демонструють, що навіть у моделюванні мікромережі показники якості істотно залежать від структури джерел, нелінійності навантаження та сценарію керування.

Нормативний блок досліджень також змінився. Базовим документом для характеристик напруги електропостачання в мережах загального призначення є ДСТУ EN 50160:2023 [8]. Методи вимірювання показників якості електроенергії визначає ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9], а рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних збурень у низьковольтних мережах – ДСТУ EN 61000-2-2:2022 [10]. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [11] регламентує випробування на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних переривань та змін напруги. Галузеву деталізацію для автоматизованих систем контролю містить СОУ НЕК 17.220.1-33:2024 [12], а норми якості в магістральних і міждержавних мережах – СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 [13]. Додатково увагу привертають стандарти управління активами, зокрема ISO 55001:2024 [14], оскільки якість електроенергії дедалі більше залежить від життєвого циклу обладнання, а не лише від моментних режимів. Регуляторні матеріали НКРЕКП [15] зводять у практичну площину допустимі значення окремих показників та процедури їх оцінювання.

Попри велику кількість робіт, у літературі зберігаються два вузькі місця. Перше – розрив між технічними дослідженнями засобів покращення якості електроенергії та аналізом чинності й узгодженості нормативних документів. Друге – недостатня

прив'язка нормативних вимог саме до типу електростанції: для традиційної синхронної генерації та для інверторно-приєднаних ВДЕ технічні механізми появи відхилень різні, але в регулюванні вони ще не завжди розмежовані з потрібною деталізацією.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи полягає у системному аналізі показників якості електроенергії та чинного нормативного забезпечення щодо їх підвищення на електростанціях традиційного та поновлювального типів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- узагальнити основні показники якості електроенергії та подати формули їх визначення;

- показати відмінності у механізмах погіршення якості електроенергії на традиційних і поновлювальних електростанціях;

- проаналізувати чинні ДСТУ, СОУ НЕК, ISO та регуляторні матеріали, що стосуються контролю і підвищення якості електроенергії;

- виявити нормативні неузгодженості та окреслити напрями вдосконалення нормативного поля.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз показників якості електроенергії

Показники якості електроенергії відображають ступінь відповідності режиму електропостачання встановленим технічним вимогам. Для електростанцій традиційного та поновлювального типів перелік основних показників загалом є спільним, однак джерела їх відхилення, тривалість збурень і характер впливу на мережу відрізняються. Для синхронної генерації типовими є відхилення, зумовлені зміною навантаження, режимами регулювання збудження, комутаціями потужного обладнання та роботою власних потреб. Для сонячних і вітрових електростанцій суттєвого значення набувають процеси, пов'язані з роботою силових перетворювачів, зміною погодних умов, швидкістю регулювання інверторів, локальною жорсткістю мережі та режимами компенсації реактивної потужності. Тому оцінювання якості електроенергії доцільно проводити не за одним узагальненим критерієм, а за системою взаємопов'язаних показників, серед яких основними є відхилення напруги, відхилення частоти, гармонічні спотворення, небаланс напруги, флікер, провали напруги, короткочасні переривання та швидкі зміни напруги.

Одним із базових показників є відхилення напруги від номінального значення. Його зручно описувати виразом:

$$\delta_U = \frac{U - U_n}{U_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U — виміряне середньоквадратичне значення напруги; U_n — номінальна напруга.

Цей показник характеризує зміну усталеного рівня напруги відносно значення, на яке розраховано приєднане обладнання. Для електростанції він є чутливим до режиму навантаження, схеми приєднання, параметрів трансформаторів, налаштування систем автоматичного регулювання напруги та наявності джерел або споживачів реактивної потужності.

Іншим фундаментальним показником є відхилення частоти:

$$\delta_f = \frac{f - f_n}{f_n} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де f — поточне значення частоти, f_n — номінальна частота енергосистеми. Частота безпосередньо пов'язана з балансом активної потужності. Для традиційних електростанцій її підтримання визначається характеристиками турбін, регуляторів швидкості та участю блоку в первинному й вторинному регулюванні. Для поновлювальної генерації ситуація складніша, оскільки значна частина станцій приєднується через інверторні системи, що не забезпечують інерційної підтримки частоти в класичному розумінні або забезпечують її лише в алгоритмічно обмеженій формі.

Вагоме місце в аналізі якості електроенергії займають гармонічні спотворення. Індивідуальний коефіцієнт гармонічної складової напруги доцільно визначати:

$$K_{U(h)} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де U_h – середньоквадратичне значення напруги гармоніки порядку h ; U_1 – середньоквадратичне значення основної гармоніки.

Для інтегральної оцінки гармонічного складу застосовують коефіцієнт сумарного гармонічного спотворення напруги:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_h^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де H – максимальний порядок гармоніки, що враховується під час розрахунку.

На традиційних електростанціях джерелами гармонік можуть бути тиристорні перетворювачі, системи збудження, частотно-керовані приводи та нелінійні споживачі власних потреб. На поновлювальних електростанціях основний внесок зазвичай створюють силові електронні перетворювачі інверторного типу.

Для трифазних мереж важливим показником є небаланс напруги. Його можна оцінювати через складники симетричних послідовностей. Коефіцієнт небалансу за напругою зворотної послідовності:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{11}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

де U_2 – напруга зворотної послідовності; U_{11} – напруга прямої послідовності основної гармоніки.

За потреби також використовують коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{11}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де U_0 – напруга нульової послідовності.

Небаланс напруги спричиняє додаткові втрати, нагрів електричних машин, погіршення умов роботи силових трансформаторів та зниження ресурсу обладнання. Для електростанцій він може бути пов'язаний як із зовнішніми мережевими умовами, так і з несиметрією внутрішніх навантажень.

Окрему групу показників становлять коливання напруги та зумовлений ними флікер. Довготривалий флікер визначають за виразом:

$$P_{lt} = \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3 \right)^{1/3}, \quad (7)$$

де $P_{st,i}$ – значення короткотривалого флікера на i -му інтервалі спостереження.

Цей показник відображає ступінь помітності коливань світлового потоку, спричинених змінами напруги. Для електростанцій традиційного типу флікер може бути пов'язаний з комутацією потужних механізмів, пуском електродвигунів або різкими змінами навантаження, тоді як для вітрових та сонячних станцій він часто виникає через змінність генерації та особливості роботи систем керування.

Для аналізу короточасних порушень електропостачання використовують показники провалів напруги, перенапруги і переривань. Глибина провалу напруги визначається як:

$$d = \frac{U_n - U_{min}}{U_n} \cdot 100\%, \quad (8)$$

де U_{min} – мінімальне середньоквадратичне значення напруги під час події.

У цьому випадку істотне значення має не лише глибина провалу, а й його тривалість, оскільки однакові за амплітудою події можуть по-різному впливати на релейний захист, приводи, автоматику та системи керування. Для електростанції ці явища мають особливе значення, оскільки навіть короточасні відхилення можуть призвести до спрацювання захистів, втрати частини навантаження або порушення стійкості технологічного процесу.

Таким чином, аналіз показників якості електроенергії повинен спиратися на сукупність параметрів, кожен із яких характеризує окремий аспект режиму електропостачання. Відхилення напруги і частоти дають уявлення про загальний стан режиму, гармонічні складові відображають ступінь електромагнітного спотворення, коефіцієнти небалансу показують симетричність трифазної системи, а флікер і провали напруги характеризують динамічні порушення. Для традиційних і поновлювальних електростанцій сам перелік показників залишається спільним, але їх фізична природа, інтенсивність прояву та засоби зниження відрізняються. Саме тому технічний аналіз цих показників має бути пов'язаний не лише з вимірюванням параметрів, а й з типом генерації, структурою приєднання до мережі та режимами керування електростанцією.

2. Аналіз нормативного забезпечення щодо підвищення показників якості електроенергії на електростанціях, прогаліни та шляхи удосконалення

Чинна нормативна база України побудована за багаторівневою схемою (рис.1.). На верхньому рівні перебувають документи, які описують самі характеристики якості електроенергії, насамперед ДСТУ EN 50160:2023 [8]. Наступний рівень становлять документи, що визначають методи вимірювання і правила оцінювання – ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9]. Окремо існує рівень сумісності для типових низькочастотних збурень – ДСТУ EN 61000-2-2:2022 [10], а також рівень випробувань

стійкості обладнання до характерних подій мережі – ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [11]. Галуzeвий вимір представлений СОУ НЕК 17.220.1-33:2024, який орієнтований на проектування автоматизованих систем обліку і контролю показників якості електроенергії [12], та СОУ НЕК 03.120.4-14:2021, який стосується норм якості в магістральних та міждержавних мережах [13]. Регуляторний контур практичного застосування відображено в матеріалах НКРЕКП [15].



Рис. 1 – Структура нормативної бази України щодо підвищення показників якості електроенергії
Fig. 1 – Structure of the regulatory framework of Ukraine for improving electricity quality indicators

Структура показує, що нормативна база вже містить усі базові складові – характеристики, вимірювання, сумісність, випробування та галузеві процедури. Проблема полягає в іншому: ці складові рознесено між документами з різною сферою дії, і на рівні електростанції їх не завжди зведено в єдину процедуру управління якістю електроенергії. Для традиційної електростанції це означає ризик того, що контроль залишиться зосередженим на точці відпуску в мережу, а внутрішні причини відхилень не буде системно простежено. Для поновлювальної електростанції ризик інший: стандарти описують параметри й методи вимірювання, але недостатньо чітко відокремлюють процедури для інверторно-приєднаних джерел, де механізми появи гармонік, флікера чи швидких змін напруги відрізняються від синхронної генерації [1, 4, 5, 8-13].

Окремою прогалиною є методична неузгодженість між чинною технічною базою та частиною публічних роз'яснень. НКРЕКП у матеріалі щодо якості електроенергії посилається на ДСТУ EN 50160:2023 як на документ, що задає параметри в точках приєднання споживачів, і водночас наводить конкретні орієнтири для 10-хвилинних значень напруги, частоти, флікера, складника зворотної послідовності та гармонік [15]. Проте в тому ж матеріалі вимірювання параметрів якості електроенергії прив'язано до ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010, тоді як чинним базовим стандартом методів вимірювання є ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9, 15]. Це не скасовує самих вимог до контролю, але створює

зайву колізію для практики: при аудиті, метрологічному забезпеченні та закупівлі приладів електростанція має орієнтуватися на актуальний документ, а довідкові й регуляторні матеріали повинні бути синхронізовані з ним.

Шляхи удосконалення нормативного забезпечення доцільно формулювати не як нескінченне розширення переліку норм, а як їхню інтеграцію. По-перше, потрібна пряма гармонізація регуляторних матеріалів і галузевих СОУ з чинними версіями ДСТУ. По-друге, для електростанцій доцільно закріпити вимогу безперервного моніторингу показників якості не лише в точці зовнішнього приєднання, а й на критичних внутрішніх шинах, вузлах перетворення та приєднання власних потреб. По-третє, нормативне поле варто деталізувати за типами генерації: для традиційних станцій – акцент на регулюванні напруги, частоти, комутаційних режимах та стані обладнання; для ВДЕ – на гармоніках, флікері, швидких змінах напруги, режимах інвертора та засобах реактивної підтримки. По-четверте, до процедур забезпечення якості електроенергії варто прив'язати підходи управління активами, оскільки деградація силових трансформаторів, фільтрів, компенсуючих пристроїв та вимірювальних систем безпосередньо впливає на якість напруги. У цьому аспекті ISO 55001:2024 може виступати не спеціальним стандартом з якості електроенергії, а рамкою для управління обладнанням, стан якого визначає здатність електростанції дотримуватися технічних вимог [4-6, 12, 14, 15].

Висновки

Якість електроенергії на електростанціях доцільно оцінювати за сукупністю показників, а не за одним інтегральним критерієм. Найбільш інформативними для практики залишаються відхилення напруги і частоти, гармонічні спотворення, небаланс, флікер та характеристики провалів напруги. Механізми появи відхилень різняться залежно від типу генерації. Для традиційних станцій вирішальними є режими синхронної машини, системи збудження та комутаційні процеси. Для поновлювальних станцій – режими перетворення енергії, інверторне керування, змінність генерації та взаємодія з мережею. Чинна нормативна база України охоплює базові характеристики якості електроенергії,

методи їх вимірювання, рівні сумісності, випробування стійкості обладнання та галузеві процедури контролю. Її сильна сторона – наявність актуалізованих ДСТУ 2022-2024 років; слабка – фрагментованість застосування на рівні електростанції. Виявлена методична неузгодженість між частиною регуляторних роз'яснень і чинною базою вимірювання показників якості електроенергії. Усунення таких розривів є необхідною умовою коректного метрологічного забезпечення та технічного аудиту. Удосконалення нормативного забезпечення доцільно спрямувати на гармонізацію документів, обов'язковий моніторинг якості на критичних вузлах генерації.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review / Shao H., Henriques R., Morais H., Tedeschi E. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 191. Art. 114094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094>.
2. Skibko Z., Hołdyński G., Borusiewicz A. Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters—Example from Poland. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 15. Art. 5573. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155573>.
3. Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm / Skibko Z., Tymińska M., Romaniuk W., Borusiewicz A. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 13. Art. 7279. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13137279>.
4. State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids / Gholami K., Islam M. R., Rahman M. M., Azizivahed A., Fekih A. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 8630–8651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.080>.
5. Etanya T. F., Tsafack P., Ngwashi D. K. Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. *Energy Reports*. 2025. Vol. 13. P. 3181-3203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050>.
6. A comprehensive review of improving power quality using active power filters / Li D., Wang T., Pan W., Ding X., Gong J. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. Art. 107389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107389>.
7. Power Quality Analysis of a Microgrid-Based on Renewable Energy Sources: A Simulation-Based Approach / Hernández-Mayoral E., Jiménez-Román C. R., Enriquez-Santiago J. A., López-López A., González-Domínguez R. A., Ramírez-Torres J. A., Rodríguez-Romero J. D., Jaramillo O. A. *Computation*. 2024. Vol. 12. No. 11. Art. 226. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation12110226>.
8. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Чинний від 08.12.2023.
9. ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). Чинний від 31.12.2023.
10. ДСТУ EN 61000-2-2:2022. Електромагнітна сумісність. Частина 2-2. Навколишнє середовище. Рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних збурень та сигналів у системах електропостачання загальної призначеності низької напруги. Чинний від 01.09.2023.
11. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022. Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливості до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги для обладнання з силою вхідного струму до 16 А на фазу. Чинний від 01.09.2023.
12. СОУ НЕК 17.220.1-33:2024. Методичні рекомендації щодо проєктування автоматизованих систем обліку та контролю показників якості електроенергії на підстанціях НЕК Укренерго. Чинний від 16.04.2024.
13. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021. Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго. Зміна № 1. Чинний від 26.11.2021.
14. ISO 55001:2024. Asset management – Asset management system – Requirements. Published, Edition 2. 2024.
15. Якість електричної енергії. НКРЕКП. Оновлено 20.11.2025.

Отримано: 20.03.2026 / Переглянуто: 27.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**Y. KLIUCHKA,**

Assistant of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: kluchka1992@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1020-9719>

¹**V. VITER,**

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3882-4675>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine*

ANALYSIS OF ELECTRICITY QUALITY INDICATORS AND REGULATORY SUPPORT FOR THEIR IMPROVEMENT AT TRADITIONAL AND RENEWABLE POWER PLANTS

The article examines the influence of quality indicators of the main power plant energy equipment on the efficiency of electric and thermal energy production. It is shown that under current conditions of limited flexible generation capacity, aging power units, and increasing requirements for fuel economy, environmental safety, and operational flexibility, the assessment of energy equipment quality extends beyond the traditional analysis of nominal efficiency alone. For turbines, boilers, condensers, generators, control systems, and cooling systems, not only energy-related characteristics but also reliability, operational, lifetime, and maintenance characteristics become decisive. It is substantiated that the operational efficiency of energy equipment is formed under the influence of a set of interrelated indicators, including efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, capacity factor, the level of losses in auxiliary systems, thermodynamic perfection, and the stability of parameters over time.

Modern studies devoted to steam turbine degradation, combustion optimization in boilers, the effect of excess air on efficiency, the exergetic distribution of losses among the main units of thermal power plants, increasing the efficiency of turbine installations under variable operating modes, improving turbogenerator cooling systems, as well as issues of equipment reliability and safe operation, are analyzed. It has been established that individual quality indicators have a quantitatively significant influence on operating performance. In particular, long-term degradation of steam turbines may cause a power loss at the level of (2–7,5)%; an increase in excess air in the boiler from 10% to 70% leads to a decrease in energy and exergetic efficiency by approximately 5%; the integration of thermal energy storage systems and the improvement of operating modes can increase maneuverability by 3–4 times and improve the profitability of a power plant. For certain turbine units, rationalization of the reheated steam temperature provided an increase in efficiency of (0,3–1,5)% and a reduction in specific equivalent fuel consumption by (3–4) g standard fuel/kWh.

A system of individual quality indicators of power equipment and a comprehensive quality indicator suitable for multicriteria assessment is proposed. It is shown that the greatest impact on the integrated efficiency of power plants is exerted by the quality indicators of turbine, boiler, and condensing equipment, as well as the reliability of generators and auxiliary systems. The results can be used in technical diagnostics, modernization, optimization of operating modes, and substantiation of priorities for repair and reconstruction of power plant energy equipment.

Keywords: energy equipment, power plant, quality indicators, operational efficiency, efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, turbine, boiler, generator, comprehensive quality indicator.

In cites: Kliuchka Y., Viter V. (2026). Analysis of electricity quality indicators and regulatory support for their improvement at traditional and renewable power plants. *Engineering*, (37), 97-105. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Reference:

1. Shao, H, Henriques, R, Morais, H & Tedeschi, E 2024, 'Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 191, Art. 114094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094>.
2. Skibko, Z, Hołdyński, G & Borusiewicz, A 2022, 'Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters—Example from Poland', *Energies*, Vol. 15, No. 15, Art. 5573. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15155573>.

3. Skibko, Z, Tyminska, M, Romaniuk, W & Borusiewicz, A 2021, 'Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm', *Sustainability*, Vol. 13, No. 13, Art. 7279. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13137279>.
4. Gholami, K, Islam, MR, Rahman, MM, Azizivahed, A & Fekih, A 2022, 'State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids', *Energy Reports*, Vol. 8, P. 8630–8651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.080>.
5. Etanya, TF, Tsafack, P & Ngwashi, DK 2025, 'Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review', *Energy Reports*, Vol. 13, P. 3181-3203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050>.
6. Li, D, Wang, T, Pan, W, Ding, X & Gong, J 2021, 'A comprehensive review of improving power quality using active power filters', *Electric Power Systems Research*, Vol. 199, Art. 107389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107389>.
7. Hernández-Mayoral, E, Jiménez-Román, CR, Enriquez-Santiago, JA, López-López, A, González-Domínguez, RA, Ramírez-Torres, JA, Rodríguez-Romero, JD & Jaramillo, OA 2024, 'Power Quality Analysis of a Microgrid-Based on Renewable Energy Sources: A Simulation-Based Approach', *Computation*, Vol. 12, No. 11, Art. 226. DOI: <https://doi.org/10.3390/computation12110226>.
8. DSTU EN 50160:2023. *Harakteristiki naprugi elektropostachannya v elektrichnih merezhah zagalnoyi pryznachennosti* (EN 50160:2022, IDT). Chinnij vid 08.12.2023 [DSTU EN 50160:2023. Characteristics of the supply voltage in public power networks (EN 50160:2022, IDT).].
9. DSTU EN 61000-4-30:2022. *Elektromagnitna sumisnist (EMC). Chastina 4-30. Metodi viprobuvannya ta vimiryuvannya. Metodi vimiryuvannya yakosti elektroenergiyi* (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). Chinnij vid 31.12.2023 [DSTU EN 61000-4-30:2022. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30. Test and measurement methods. Power quality measurement methods (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT).] (in Ukraine).
10. DSTU EN 61000-2-2:2022. *Elektromagnitna sumisnist. Chastina 2-2. Navkolishnye sereдовishe. Rivni sumisnosti dlya nizkochastotnih konduktivnih zburen ta signaliv u sistemah elektropostachannya zagalnoyi pryznachennosti nizkoyi naprugi*. Chinnij vid 01.09.2023 [DSTU EN 61000-2-2:2022. Electromagnetic compatibility. Part 2-2. Environmental environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signals in general purpose low-voltage power supply systems.] (in Ukraine).
11. DSTU EN IEC 61000-4-11:2022. *Elektromagnitna sumisnist. Chastina 4-11. Metodiki viprobuvannya ta vimiryuvannya. Viprobuvannya na nesprijnyatlivist do provaliv naprugi, korotkochasni pererivan ta zminen naprugi dlya obladnannya z siloyu vhidnogo strumu do 16 A na fazu*. Chinnij vid 01.09.2023 [DSTU EN IEC 61000-4-11:2022. Electromagnetic compatibility. Part 4-11. Testing and measurement methods. Testing for immunity to voltage dips, short interruptions and voltage variations for equipment with input currents up to 16 A per phase.] (in Ukraine).
12. SOU NEK 17.220.1-33:2024. *Metodichni rekomendaciyi shodo proyektuvannya avtomatizovanih sistem obliku ta kontrolyu pokaznikiv yakosti elektroenergiyi na pidstanciyah NEK Ukrenergo*. Chinnij vid 16.04.2024 [SOU NEK 17.220.1-33:2024. Methodological recommendations for the design of automated systems for the control of electricity quality indicators at substations of NEK Ukrenergo.] (in Ukraine).
13. SOU NEK 03.120.4-14:2021. *Normi yakosti elektrichnoyi energiyi v magistralnih ta mizhderzhavnih elektrichnih merezhah NEK Ukrenergo. Zmina № 1*. Chinnij vid 26.11.2021 [SOU NEK 03.120.4-14:2021. Standards for the quality of electric energy in main and interstate electric networks of NEK Ukrenergo. Amendment No. 1.] (in Ukraine).
14. ISO 55001:2024. *Asset management – Asset management system – Requirements*. Published, Edition 2/ 2024 (in Ukraine).
15. NKREKP 2025, *Yakist elektrichnoyi energiyi* [The quality of electric energy] (in Ukraine).

Submission received:03.20.2026/Revised: 04.27.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09>

УДК 621.923

¹ **А. О. СКОРКІН**, кандидат технічних наук

доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання

e-mail: a.o.skorkin@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-8341>

¹ **О. Л. КОНДРАТЮК**, кандидат технічних наук

доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання

e-mail: kondr20071@i.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0483>

² **К. А. ШОФУЛ**, аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати

e-mail: Shoful.k@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-6389>

² **О. О. ІСІЧЕНКО**, аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати

e-mail: shurik_i@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3419-8192>

¹ *Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*

майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

² *Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",*

вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ШЛІФУВАННЯ ЗАГОТОВОК ІЗ ЦЕМЕНТОВАНИХ СТАЛЕЙ

Застосування шліфування як заключна операція при виготовленні деталей із загартованих сталевих цементованих заготовок є кращим порівняно з іншими методами механічної обробки. Загальновідомо, що такий метод обробки забезпечує отримання високої зносостійкості та точності шліфованих поверхонь при високорентабельній продуктивності процесу та економічності за рахунок заміни гарту ТВЧ суцільним гартуванням і скорочення витрат на виконання аналогічних за призначенням, інших процесів хіміко-термічної обробки (азотування, ціанування та ін.).

Однак процес шліфування загартованих цементованих сталей вивчений недостатньо глибоко. Ряд дослідників зазначає, що зношування абразивних кіл при шліфуванні цементованих заготовок істотно більше в порівнянні з обробкою однакових за твердістю високовуглецевих сталевих заготовок, а отже, забезпечується менша продуктивність при зніманні однакових припусків. Очевидно, це пов'язано з відмінностями структури поверхневого шару через наявність хрому, молібдену, нікелю та інших елементів, що легують, що збільшує теплофізичну напруженість процесу шліфування. Особливо маловивченими є аспекти впливу на продуктивність обробки різномірності фізико-механічних властивостей серцевини та поверхневого шару заготовок, ступінь короблення та пригогоутворень при термообробці та шліфуванні.

Стаття присвячена аналізу особливостей процесу шліфування деталей із цементованих сталей та взаємозв'язку основних показників якості з експлуатаційними характеристиками. Проведене дослідження підкреслює актуальність використання шліфування як фінішної операції для досягнення високої зносостійкості та точності поверхонь, незважаючи на недостатню вивченість процесу для цементованих сталей, які мають підвищену абразивну зносостійкість поверхневого шару.

Розглянуто ключові параметри, що впливають на довговічність деталей, зокрема шорсткість, хвилястість, макрогеометрію та мікротвердість поверхневого шару.

Досліджено зміни структури поверхневого шару (перетворення аустеніту в мартенсит, «ефект самозагартування») під впливом високих температур і деформацій, що виникають під час шліфування.

Проаналізовано існуючі математичні та емпіричні моделі абразивного зерна та робочої поверхні шліфувального круга (ШК), що описують вплив геометричних параметрів та режимів обробки на якість поверхні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: шліфування, загартована сталь, абразивне зерно, поверхневий шар.

Як цитувати: Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Шофул К. А., Ісиченко О. О. Особливості шліфування заготовок із цементованих сталей. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 106-115. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09>



Вступ

Процес експлуатації механізмів і машин супроводжується, як правило, поверхневим зносом рухомих елементів, що серйозно позначається на якості поверхневого шару та експлуатаційних характеристик працюючих деталей. Параметри міцнісного ресурсу деталей та їх рівень опору втомному зносу, що визначаються точністю виготовлення, шорсткістю та хвилястістю поверхні, мікротвердістю поверхневого шару та фізико-механічними характеристиками, впливають на показники надійності та довговічності механізмів та машин в цілому.

Серед перерахованих параметрів найбільш часто приділяють увагу горст-

кості поверхні, яка впливає не тільки на умови контакту елементів механізмів, що перебувають у поєднанні, а й визначає на мікрорівні напружений стан в поверхневому шарі. Формоване грубою шорсткістю недосконалості мікропрофілю поверхні можуть стати зоною вогнища освіти і подальшого розвитку різноманітних експлуатаційних дефектів, у тому числі втомних тріщин. Тому надійність і довговічність робочих деталей слід оцінювати з поліпшення якісних характеристик шорсткості поверхневого шару деталей рахунок одноразового чи багаторазового застосування послідовних технологічних методів механічної обробки заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В даний час спостерігається активне застосування та розвиток методів науглерожування сталевих деталей та заготовок. Тенденція до модернізації вже наявних і розробці нових методів такого роду зміцнення обумовлена постійно змінними вимогами, що пред'являються до відповідальних деталей, через що одним з найбільш раціональних способів є поліпшення фізико-механічних властивостей за допомогою процедури цементування, термообробки та подальшого шліфування. Сучасні застосовувані методи цементації сталей при низькому тиску (LCP) по відношенню до традиційної цементації (метод якої відомий більше 200 років [1]) мають відмінні переваги, що полягають у відсутності внутрішнього окислення, мінімального жолоблення деталі або заготовки, найкращої однорідності і якості одержуваних [2-4]. Серед публікацій, присвячених питанням оцінки якості цементованого зміцненого шару після шліфування, найчастіше розглядається вакуумний метод цементації сталі [5, 6, 7], зокрема модер-

нізований на його основі метод потокового науглерожування під низьким тиском [7]. У роботі [5] як кращі і найбільш ефективні методи зміцнення вказані іонні цементація і нітроцементація, які дозволяють з високою точністю керувати процесом насичення сталі вуглецем. Серед сучасних інноваційних технологій слід зазначити метод мікронауглерещування шліфованих поверхонь виробів із сталі без застосування ХТО та термообробки [8-10]. На відміну від традиційної термообробки, науглерожування відбувається одночасно з процесом шліфування, що призводить до більш продуктивного використання енергії, що виділяється, і ефективності насичення оброблюваної поверхні вуглецем при одночасному збільшенні механічних властивостей матеріалу і якості поверхневого шару. Слід зазначити, що для реалізації будь-якого з вищезгаданих методів необхідно мати якісне обладнання, оснащене високопродуктивними комп'ютеризованими системами та сучасними засобами автоматизації.

Постановка проблеми

Незважаючи на очевидну ефективність застосування цементації та шліфування сталевих виробів, існує також ряд особливостей на етапі заключної обробки заготовок. При шліфуванні цементованих сталей з високим ступенем концентрації

вуглецю в поєднанні з легуючими присадками хрому, нікелю, молібдену та ін. Саме поняття «абразивна зносостійкість» широко використовується в термінології багатьма дослідниками в галузі шліфування [10-13] і пояснюється як процес опору

відділенню мікрочастинок матеріалу від поверхні, що зношується абразивними тілами під дією нормальної сили різання з частковим перетворенням зовнішнього шару в стружку. Як зазначають автори роботи [10], механізм зносостійкості матеріалу є складним процесом, який визначається не тільки силовими факторами, а й характеристиками структури самого матеріалу та його втомними властивостями. Тому процес обробки шліфуванням цементованих заготовок поряд з не цементованими набагато частіше призводить до утворення поверхневих дефектів шліфувальних внаслідок вуглецевого крихтіння. Встановлено, що у процесі шліфування цементованих сталей у зоні формоутворення нової поверхні абразивними зернами контактна температура сягає 1000-1500°C. При цьому більшість аустеніту, що знаходиться в поверхневому шарі цементованої сталі, активно перетворюється на мартенсит. У процесі дії високої температури з почерговим охолодженням відбу-

вається самозагартування. Перетворення аустеніту на мартенсит супроводжується об'ємними змінами кристалічної решітки, що впливає на показники якості шліфованої поверхні, зокрема на залишкові напружки та мікротвердість. Мартенситний поверхневий шар важко обробити механічно.

Незважаючи на високий рівень вивченості широкого спектра питань, пов'язаних із високою якістю обробки поверхні високпористими колами, область дослідження щодо оптимізації процесів шліфування зміцнених деталей таким методом у виробництві до кінця не вивчена. Так, наприклад, у разі інноваційної технології сухого шліфування торцевих поверхонь зубчастих шестерень автомобілів перспективність методу представлена в роботі [15-17]. Експериментами показано, що висока пористість структури абразивних кіл демонструє найгірші показники якості оброблених поверхонь (з точки зору виникнення шліфувальних припалів) порівняно з менш пористими шліфувальними колами.

Викладення основного матеріалу

Розглядаючи будову поверхневого шару (ПШ) металу, слід мати на увазі, що воно різко відрізняється від основного матеріалу, так як несе на собі сліди технологічного процесу обробки, в результаті якого, як правило, утворюється дефектний шар зі спотвореною структурою. Крім того, при експлуатації виробу постійно йде процес зміни властивостей ПС через силові, температурні, окисні та інші впливи. Так, при обробці металів різанням (особливо при шліфуванні) виникнення в поверхневому шарі нових утворень відбувається в результаті дії двох протилежних процесів - зміцнення (наклепу) в результаті впливу на поверхню зусиль різання та зняття наклепу, а також зміни ПШ в результаті впливу температури різання. У різних умовах домінує вплив одного, то іншого чинника.

Загальною для контактуючих деталей є будова поверхневих шарів (рис. 1).

Зона 1— адсорбована плівка газів, вологи та мастильно-охолоджувальної рідини, яка видаляється нагріванням деталі у вакуумі; зона 2 - деформований, сильно роздроблений метал з спотвореною решіткою кристалів і з безуглицевими під дією високих температур при шліфуванні ділян-

ками; в ньому знаходяться оксиди та нітриди, порожнечі та надриви, а також тріщини; зона 3-зерна, сильно деформовані під дією тиску шліфувального кола і дотичних напруж при шліфуванні; у зоні містяться структури вільного цементиту, що утворився під дією високих температур; зона 4 - метал з вихідною структурою.

У процесі шліфування від впливу абразивного кола на поверхні металу заготовки залишаються гребінці та западини. Структура ПШ змінюється. Поверхневий шар зазнає пластичних деформацій, утворюється наклеп, його твердість збільшується, виникають технологічні залишкові напружки.

Ступінь наклепу металу та глибина проникнення пластичних деформацій залежать від методу обробки та елементів режиму різання (подачі, глибини та швидкості різання). При підвищенні подачі та глибини різання товщина наклепаного шару збільшується, а зі збільшенням швидкості різання, навпаки, зменшується. При легких режимах різання товщина наклепаного шару виражається в сотих частках міліметра, а при важких (при великій подачі та глибині різання) – у десятих частках міліметра.

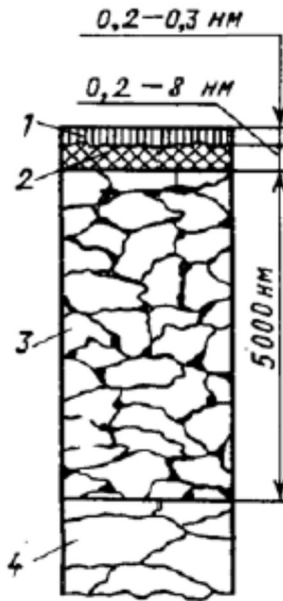


Рис. 1. – Схема будови поверхневого шару металу
Fig. 1. – Diagram of the structure of the surface layer of metal

При шліфуванні заготовок із загартованих високовуглецевих і легуваних сталей (у тому числі - цементованих) відбувається часткова відпустка поверхневого шару з утворенням змішаної структури та зменшенням твердості, а також вторинна загартування металу, що знаходиться на відпущеному м'якшому шарі, який поступово проходить через всі етапи відпустки. У зв'язку з цим при шліфуванні загартованих високовуглецевих і цементованих сталей виходять багатошарові структурні утворення, які утворюються внаслідок послідовної передачі тепла різним обсягам металу. Структурним і фазовим перетворенням поверхневого шару при шліфуванні схильні лише попередньо загартовані сталі, що залежить від швидкостей нагрівання та охолодження обсягів матеріалу, що входять до зони контакту кола із заготівлею. Швидкість нагріву металу досягає в цьому випадку тисячі градусів за секунду. Вихідна перлітна структура відпаленої сталі при таких швидкостях нагріву може не перетворитися на аустеніт, оскільки дифузний характер перетворення потребує деякого проміжку часу. Якщо перлітна структура сталі при нагріванні не перетвориться на аустеніт, то і після її охолодження вона залишиться колишньою. Якщо ж перліт перетвориться на аустеніт, то структура після охолодження змінюється по глибині і відповідає швидкості охолодження металу (мартенсит, трооститомартенсит, троостит, сорбіт, дрібнопластинчастий перліт, крупнопластинчастий перліт).

Якщо здійснювати шліфування заготовок із цементованої сталі з мартенситною структурою, то її перехід в аустеніт вимагатиме незначного часу для дифузійних процесів, і аустеніт перетворюється на мартенсито-аустеніт.

Збільшення температурного впливу при шліфуванні на заготівлю з цементованих сталей (наприклад, внаслідок підвищення продуктивності обробки) призводить до формування поверхневих шарів із сильно зміненим структурно-фазовим станом, які чітко виділяються після травлення мікрошліфів у вигляді темних ділянок цементованих сталей. Цей процес супроводжується фазовими перетвореннями, пов'язаними з розпадом вихідних поверхневих метастабільних структур, наприклад мартенситних, і створенням нових структур під час вторинного загартування. Товщина зміцненого поверхневого шару в цих умовах досягає декількох десятків міліметра і залежить від глибини нагріву матеріалу до температур вище критичних точок. Слід зауважити, що величини критичних точок значною мірою визначаються деформацією структури металу, швидкістю його нагрівання та охолодження в ході абразивної обробки.

Оскільки шліфування є процесом контактної взаємодії заготівлі та інструменту переважно використовувати моделі ріжучої кромки а.з.(абразивне зерно) параметри, що характеризують специфіку цього фізичного процесу. Оскільки як інтегральна характеристика РП абразивного

інструменту обрана відносна опорна поверхня, пропонується форму ріжучої кромки моделювати за допомогою аналогічної функції. За допомогою CAD систем зробимо моделювання ріжучої кромки а.з. об'ємною фігурою другого

порядку (рис. 2) з твірною, яка описується математичною залежністю:

$$x^2 + z^2 = b_p y^{2\nu_p} \quad (1)$$

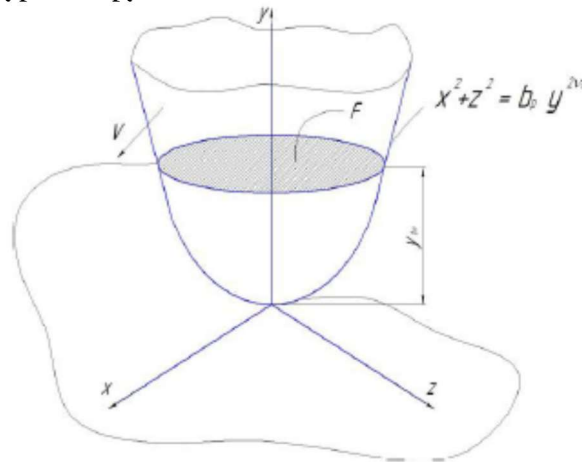


Рис. 2 – Ріжуча кромка а.з. у вигляді поверхні обертання другого порядку
Fig. 2 – Cutting edge of the a.z. in the form of a second-order surface of revolution

Вісь x направимо у бік вектора швидкості різання, вісь y – до нормально оброблюваної поверхні, вісь z – перпендикулярно до цих осей, початок координат «0» помістимо у вершину ріжучої кромки а.з. Розглянемо роботу ріжучої кромки а.з. в процесі шліфування (наприклад - заготовок з цементованих сталей) з постійною окружною швидкістю V і глибиною його впровадження в поверхню, що обробляється $y_{\text{вн}}$. У теорії різання слід вважати усталеною об'ємну модель зерна (сфера, піраміда, конус, еліпс, циліндр та інших.), отже, необхідно враховувати розподіл складових сили шліфування за деякою наближеною площиною, а, по передній частині бічної поверхні ріжучої кромки а.з. Параметр b_p характеризує швидкість наростання профілю перерізу ріжучої кромки в залежності від глибини її впровадження в оброблюваний матеріал, а параметр ν_p – форму твірної ($\nu_p < 1$ – кромка опукла, $\nu_p = 1$ – кромка конусоподібна, $\nu_p > 1$ – кромка лійкоподібна). Вісь спрямована від вершини вглиб зерна. Вісь симетрії утворює кромки нормальна до оброблюваної поверхні. У процесі шліфування абразивне зерно заглиблюється на певну глибину оброблюваного матеріалу. Параметр $y_{\text{вн}}$ характеризує висоту частини одиничної ріжучої кромки, яка впроваджується в заготовку та здійснює процес мікроподрапин.

Значення глибини впровадження зерна в оброблюваний матеріал:

$$y_{\text{вн}} = S_p \cdot \frac{n_{\text{заг}}}{n_{\text{кр}}} \quad (2)$$

де S_p - візна подача шліфувального кола на обертт заготовлі, мм/об;

$n_{\text{заг}}$ - число оборотів шпинделя заготовки за хвилину, об/хв;

$n_{\text{кр}}$ - кількість обертів шпинделя кола за хвилину, об/хв.

Будь-яка технологічна операція абразивної обробки шліфуванням поверхні металевої заготовки, як було зазначено раніше, є складним процесом мікрорізання, що відрізняється від інших способів механічної обробки. Застосування процедури шліфування на фінішній стадії формоутворення ускладнюється підвищеними вимогами до точності розмірів і якості обробленої поверхні. При цьому, якщо на майбутніх шліфувальних операціях допустиме коригування геометричних розмірів, форми, шорсткості, хвилястості та інших параметрів, то на стадії фінішної обробки у зв'язку з малими значеннями припусків, що видаляються, така можливість або має ряд обмежень, або неприпустима зовсім. З цієї причини обумовлюється неможливість усунення шліфувальних дефектів, які, як правило, утворюються через неправильно підібрані режими різання та переводять практично готову деталь у виробничий

брак. При здійсненні процесу шліфування важливо приділяти належну увагу не тільки одержуванім в результаті обробки деталям, а й абразивним інструментам. Як і інших ріжучих інструментів, їх застосування у виробничому циклі нерідко супроводжується випадками передчасного виходу з ладу, через що необхідний контроль ступеня абразивного зносу. Враховуючи, що технологія шліфування супроводжується високими робочими швидкостями шліфувального кола, у разі його непередбаченого руйнування виникає ризик як пошкодження заготовлі деталі, що обробляється, і шліфувального обладнання, так і механічного травмування людини, що неприпустимо. Слід зазначити, що вищевикладені та інші завдання, які вирішуються в рамках деталізації процесу шліфування, у більшості випадків є досить трудомісткими і складно реалізованими навіть при проведенні експериментальних досліджень (як, наприклад, аналіз процесу формоутворення стружки при різанні). Нині широко використовуються чисельні методи цифрового моделювання процесів шліфування. Для цієї мети широко використовуються спеціальні програмні пакети комп'ютерного кінцево-

елементного аналізу типу ANSYS, Solidworks, Abaqus, MSC.Patran-Nastran, LS-DYNA та ін. При цьому отримані результати імітаційного моделювання та емпіричні дані реальних процесів абразивної обробки добре узгоджуються між собою. Загальний підхід до розгляду переважної кількості завдань математичного опису шліфування зводиться до моделювання різання матеріалів одиничними абразивними зернами різної геометричної форми [16]. Макромасштабні моделі враховують взаємодію кола та заготовлі в цілому, тоді як мікромасштабні моделі дозволяють сфокусуватися на окремих взаємодіях зерна та заготовлі. В останньому випадку процедура мікро-різання-шліфування одиничним а.з. розглядається як однолезова фрезерна обробка окремою ріжучою кромкою зі зняттям стружки. Особлива увага при мікромасштабному вивченні процесу шліфування приділяється впливу на виникаючі у вершині одиничного зерна тангенціальні (або дотичні) F_T і нормальні F_N складові сили різання (рис. 3), режимів різання, сил тертя, структури оброблюваного матеріалу заготовки і кола.

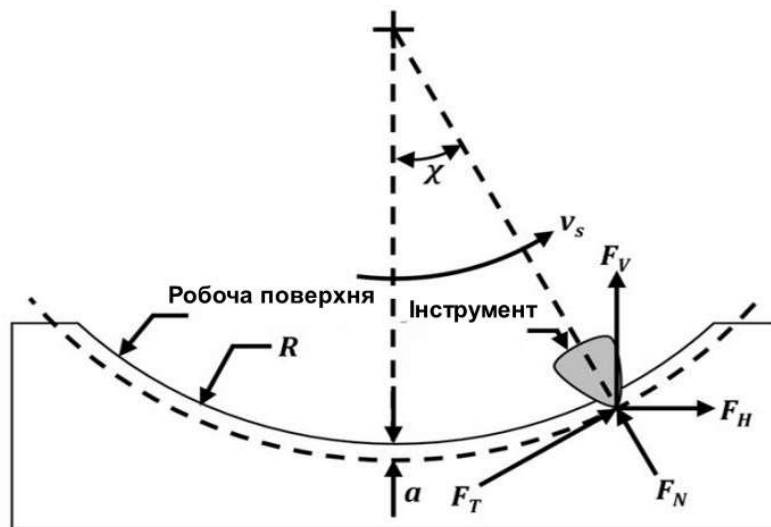


Рис. 3 – Схематичне представлення сил різання, що виникають.

Fig. 3 - Schematic representation of the resulting cutting forces.

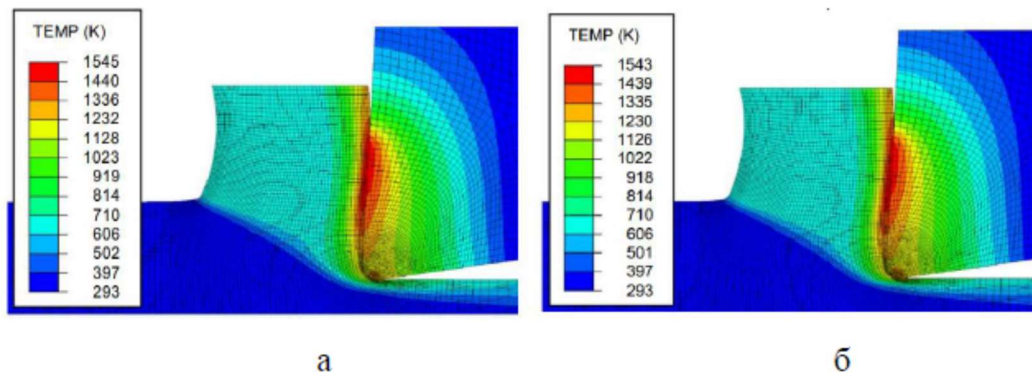


Рис. 4 – Оцінка розподілу температури в області контакту вершини ріжучої кромки із заготовкою зі сплаву AISI 4340 у програмі Abaqus/Explicit: при $\tau_p = 500$ МПа (а) та при 700 МПа (б)

Fig. 4 – Assessment of the temperature distribution in the area of contact of the tip of the cutting edge with the workpiece and AISI 4340 alloy using the Abaqus/Explicit program: at $\tau_p = 500$ MPa (a) and at 700 MPa (b)

При моделюванні задачі в програмі Abaqus/Explicit, в умовах підвищених швидкостей різання і малої інтенсивності тертя відбувається ковзання стружки, що викликає перегрів понад 1000 °С в зоні різання (рис. 4) і надмірне зношування ріжучого інструменту (внаслідок значного рівня дотичних напруг $\tau_p = 500 \dots 700$ МПа), що значно знижує його ресурс і може призвести до руйнування. З цієї причини цю проблему слід розглядати в рамках

термомеханічного аналізу моделей інструменту та заготовлі із застосуванням методу кінцевих елементів.

В результаті було встановлено, що нормальні сили різання збільшуються зі зростанням швидкості різання через деформаційне зміцнення заготовлі в зоні шліфування, а тангенціальні сили зменшуються через зниження тертя між інструментом і заготівлею.

Висновки

Таким чином, враховуючи все перераховане вище, можна сформулювати наступні висновки. По-перше, контроль силового впливу (особливо сил різання) з боку різального абразивного інструменту (одиночного зерна) по відношенню до оброблюваної заготовлі є основним критерієм при віртуалізації процесів шліфування з позиції механіки контактної взаємодії, що дозволяє вирішити переважну кількість завдань у галузі шліфування. По-друге, комплексний підхід до розгляду та вирішення завдань у цій галузі неможливий без застосування технології цифрового комп'ютерного моделювання, що базується

в основному на методі кінцевих елементів, зважаючи на підвищену обчислювальну складність, урахування великої кількості всіляких факторів та стохастичності описуваних процесів. І по-третє, застосування програмного забезпечення, що постійно вдосконалюється, для реалізації інтегрованих методів шліфування надасть можливість значною мірою спростити вирішення завдань з оптимізації режимів різання, періоду стійкості абразивних інструментів, отримання мікро- і макропараметрів поверхонь оброблених заготовок та інших динамічно розширюваних у цьому напрямку питань.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Arrazola P. J., Ozel T. Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining. *International journal of mechanical sciences*. 2010. Vol. 52 (1). Pp. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.10.001>

2. Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis / Li L., Zhang Ya., Cui X., Said Z., Sharma Sh., Liu M., Gaoa T., Zhou Z., Wang Xi., Li Ch. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 102. Pp. 921–954. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.074>
3. Influence of the geometrical features of the cutting edges of abrasive grains on the removal efficiency of the Ti6Al4V titanium alloy / Rupina L., Lipinski D., Banaszek K., Kacalak W., Szafraniec F. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 6189–1–6189–21. <https://doi.org/10.3390/ma15186189>
4. Doman D. A., Warkentin A., Bauer R. Finite element modeling approaches in gridding. *International journal of machine tools and manufacture*. 2009. Vol. 49 (2). Pp. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.002>
5. Anderson D., Warkentin A., Bauer R. Experimental and numerical investigations of single abrasive-graincutting. *International journal of machine tools & manufacture*. 2011. Vol. 51 (12). Pp. 898–910. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006>
6. Finite element analysis on single abrasive grinding Ti6Al4V alloy / HuoW., Zhang X., Dong Q., Shao J. *Key engineering materials*. 2018. Vol. 764. Pp. 184–193. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.764.184>
7. Surface integrity evaluation within dry grinding process on automotive gears / Lerra F., Grippo F., Landi E., Fortunato A. *Cleaner engineering and technology*. 2022. Vol. 9. Pp. 100522–1–100522–9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100522>
8. The influence of grinding wheel type on microhardness and residual stresses in vacuum-carburised 20MnCr5 steel using the single-piece flow method / Zgorniak P., Wolowiec-Korecka E., Januszewicz B., Sikora M., Rosik R. *IOP conference series : materials science and engineering*. 2020. Vol. 743. Pp. 012049–1–012049–7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/743/1/012049?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Dubovska R., Majerik J., Chochlikova H. Phisico-chemical state stabilization of high strength steels machined surface. *Proceedings in manufacturing systems*. 2011. Vol. 6 (2). Pp. 75–80.
10. Dubovska R., Jambor J., Majerik J. Qualitative aspects of machined surfaces of high strength steels. *Procedia engineering*. 2014. Vol. 69. Pp. 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.038>
11. Surface strengthening mechanism of the active grinding carburization /Sun C., Hong Yu., Xiu Sh., Liang M., Wangc D., Xua Ch., Feng W. *Tribology international*. 2023. Vol. 185, no. 108569.
12. Grinding residual stress optimization under the micro-carburizing effect / Hong Yu., Sun C., Xiu Sh., Xua Ch., Liang D., Deng Ya. *Tribology international*. 2023. Vol. 188, no. 108807. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108807>
13. Quality evaluation of carburized surfaces of steels used in military technology / Dobrocky D., Joska Z., Studeny Z., Pokorny Z. *Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 20, no. 2. Pp. 152–161. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.028>
14. Stachurski W., Januszewicz B., Sawicki J. The influence of the depth of grinding on the condition of the surface layer of 20MnCr5 steel ground with the minimum quantity lubrication (MQL) method. *Materials*. 2022. Vol. 15 (4). Pp. 1336–1–1336–20. <https://doi.org/10.3390/ma15041336>
15. Sawicki J., Kruszynski B., Wojcik R. The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNI6-6 steel after carburizing. *Advances in science and technology research journal*. 2017. Vol. 11 (2). Pp. 17–22. <https://doi.org/10.12913/22998624/67671>
16. Wojcik R., Sawicki J. Effects of thermo-chemical treatment and grinding process of external cylindrical surfaces on residual stresses in 13CrMo4-5 steel. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2023. Vol. 120 (1). Pp. 10–21 <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9621>
17. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. № 2/1 (98). P. 60–69 (in Ukraine).

Отримано: 02.02.2026 / Переглянуто: 16.03.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**SKORKIN A., PhD**

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding,
e-mail: a.o.skorkin@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3032-8341>

¹**KONDRATYUK O., PhD**

Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding,
e-mail: kondr20071@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3263-0483>

²**SHOFUL K., Postgraduate Student**

Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines
e-mail: Shoful.k@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9527-6389>

²**ISICHENKO O., Postgraduate Student**

Department of Mechanical Engineering Technology and Metal-Cutting Machines
e-mail: shurik_i@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3419-8192>

¹*V.N. Karazin Kharkiv National University,
16 Universytetska St., Kharkiv, 61003, Ukraine.*

²*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
2 Kyrpychova St., Kharkiv, 61002, Ukraine*

FEATURES OF GRINDING OF BLANKS FROM CEMENTED STEEL

The use of grinding as a final operation in the manufacture of parts from hardened steel cemented blanks is preferable compared to other methods of mechanical processing. It is well known that this processing method provides high wear resistance and accuracy of ground surfaces with highly cost-effective process productivity and cost-effectiveness due to the replacement of high-temperature hardening with continuous hardening and reducing the cost of performing other chemical-thermal treatment processes similar in purpose (nitriding, cyanidation, etc.).

However, the grinding process of hardened cemented steels has not been studied in sufficient depth. A number of researchers note that the wear of abrasive wheels when grinding cemented workpieces is significantly greater compared to the processing of high-carbon steel workpieces of the same hardness, and therefore, lower productivity is provided when removing the same allowances. Obviously, this is due to differences in the structure of the surface layer due to the presence of chromium, molybdenum, nickel and other alloying elements, which increases the thermophysical stress of the grinding process. Particularly poorly studied are the aspects of the influence on the processing performance of the heterogeneity of the physical and mechanical properties of the core and the surface layer of the workpieces, the degree of warping and scorching during heat treatment and grinding.

The article is devoted to the analysis of the features of the grinding process of parts made of cemented steels and the relationship between the main quality indicators and operational characteristics. The conducted research emphasizes the relevance of using grinding as a finishing operation to achieve high wear resistance and surface accuracy, despite the insufficient study of the process for cemented steels, which have increased abrasive wear resistance of the surface layer.

The key parameters that affect the durability of parts are considered, in particular, roughness, waviness, macrogeometry and microhardness of the surface layer.

Changes in the structure of the surface layer (austenite transformation into martensite, "self-hardening effect") under the influence of high temperatures and deformations that occur during grinding are studied.

Existing mathematical and empirical models of abrasive grain and the working surface of a grinding wheel (GW) are analyzed, describing the influence of geometric parameters and processing modes on the surface quality.

KEYWORDS: grinding, hardened steel, abrasive grain, surface layer.

In cites: Skorkin A., Kondratyuk O., Shoful K., Isichenko O. (2026). Features of grinding of blanks from cemented steel. Engineering, (37), 106-115. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-09> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Arrazola, PJ & Ozel, T 2010, 'Investigations on the effects of friction modeling in finite element simulation of machining', *International journal of mechanical sciences*, Vol. 52 (1), Pp. 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2009.10.001>
2. Li, L, Zhang, Ya, Cui, X, Said, Z, Sharma, Sh, Liu, M, Gao, T, Zhou, Z, Wang, Xi, Li, Ch 2023, 'Mechanical behavior and modeling of grinding force: A comparative analysis', *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 102, Pp. 921–954. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.074>
3. Rupina, L, Lipinski, D, Banaszek, K, Kacalak, W & Szafraniec, F 2022, 'Influence of the geometrical features of the cutting edges of abrasive grains on the removal efficiency of the Ti6Al4V titanium alloy', *Materials*, Vol. 15, Pp. 6189–1–6189–21. <https://doi.org/10.3390/ma15186189>
4. Doman, DA, Warkentin, A & Bauer, R 2009, 'Finite element modeling approaches in gridding', *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 49 (2), Pp. 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.002>
5. Anderson, D, Warkentin, A & Bauer, R 2011, 'Experimental and numerical investigations of single abrasive-graincutting', *International journal of machine tools & manufacture*, Vol. 51 (12), Pp. 898–910. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006>
6. Huo, W, Zhang, X, Dong, Q & Shao, J 2018, 'Finite element analysis on single abrasive grinding Ti6Al4V alloy', *Key engineering materials*, Vol. 764, Pp. 184–193. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.764.184>
7. Lerra, F, Grippo, F, Landi, E & Fortunato, A 2022, 'Surface integrity evaluation within dry grinding process on automotive gears', *Cleaner engineering and technology*, Vol. 9, Pp. 100522–1–100522–9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100522>
8. Zgorniak, P, Wolowiec-Korecka, E, Januszewicz, B, Sikora, M & Rosik, R 2020, 'The influence of grinding wheel type on microhardness and residual stresses in vacuum-carburised 20MnCr5 steel using the single-piece flow method', *IOP conference series : materials science and engineering*, Vol. 743, Pp. 012049–1–012049–7. https://doi.org/10.1088/1757-899X/743/1/012049?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
9. Dubovska, R, Majerik, J & Chochlikova, 2011, 'Physico-chemical state stabilization of high strength steels machined surface', *Proceedings in manufacturing systems*, Vol. 6 (2), Pp. 75–80.
10. Dubovska, R, Jambor, J & Majerik, J 2014, 'Qualitative aspects of machined surfaces of high strength steels', *Procedia engineering*, Vol. 69, Pp. 646–654. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.038>
11. Sun, C, Hong, Yu, Xiu, Sh, Liang, M, Wang, D, Xua, Ch & Feng, W 2023, 'Surface strengthening mechanism of the active grinding carburization', *Tribology international*, Vol. 185, no. 108569.
12. Hong, Yu, Sun, C, Xiu, Sh, Xua, Ch, Liang, D & Deng, Ya 2023, 'Grinding residual stress optimization under the micro-carburizing effect', *Tribology international*, Vol. 188, no. 108807. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108807>
13. Dobrocky, D, Joska, Z, Studeny, Z & Pokorny, Z 2020, 'Quality evaluation of carburized surfaces of steels used in military technology', *Manufacturing Technology*, Vol. 20, no. 2. Pp. 152–161. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.028>
14. Stachurski, W, Januszewicz, B & Sawicki, J 2022, 'The influence of the depth of grinding on the condition of the surface layer of 20MnCr5 steel ground with the minimum quantity lubrication (MQL) method', *Materials*, Vol. 15 (4), Pp. 1336–1–1336–20. <https://doi.org/10.3390/ma15041336>
15. Sawicki, J, Kruszynski, B & Wojcik, R 2017, 'The influence of grinding conditions on the distribution of residual stress in the surface layer of 17CRNI6-6 steel after carburizing', *Advances in science and technology research journal*, Vol. 11 (2), Pp. 17–22. <https://doi.org/10.12913/22998624/67671>
16. Wojcik, R & Sawicki, J 2023, 'Effects of thermo-chemical treatment and grinding process of external cylindrical surfaces on residual stresses in 13CrMo4-5 steel', *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, Vol. 120 (1) Pp. 10–21 <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9621>
17. Skorkin, A, Kondratyuk, O, Lamnauer, N & Burdeinaya, V 2019, 'Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 2/1 (98), P. 60–69 (in Ukraine).

Submission received: 02.02.2026/Revised: 03.16.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-10>

УДК 62-932:62.532

¹КИРИЧЕНКО І. Г., доктор технічних наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодоваe-mail: igk160450@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2128-3500>¹ГУРКО В. О., аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодоваe-mail: volgurko@khadi.kharkov.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9216-6682>¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОГІДРОПРИВОДУ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ФРОНТАЛЬНОГО НАВАНТАЖУВАЧА ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧОГО КОМПЛЕКСУ

Керування робочим обладнанням фронтального навантажувача характеризується значною кількістю невизначеностей, зумовлених змінними умовами взаємодії ковша з матеріалом, внутрішніми витоками в гідросистемі, стисливістю робочої рідини, а також впливом зовнішніх навантажень і зміною параметрів елементів приводу в процесі роботи. Наявність таких невизначеностей ускладнює побудову адекватних математичних моделей і знижує ефективність системи автоматичного керування робочим обладнанням, оскільки математична модель не відображає реальну динаміку робочого обладнання. Метою даної роботи є підвищення ефективності керування робочим обладнанням фронтального навантажувача шляхом розробки математичної моделі електрогідроприводу, зручної для використання в інформаційно-керуючому комплексі машини. У роботі використано методи математичного моделювання динамічних систем, а також методи лінеаризації нелінійних залежностей з подальшим поданням моделі у просторі станів. Побудову моделі здійснено на основі структурної схеми системи керування електрогідроприводом із урахуванням основних фізичних процесів, що відбуваються в гідроприводі. Отримано лінеаризовану математичну модель електрогідроприводу, подану у просторі станів у вигляді системи шести диференціальних рівнянь першого порядку. Результати імітаційного моделювання в середовищі MATLAB Simulink узгоджуються з фізичними процесами в електрогідроприводі робочого обладнання фронтального навантажувача та підтверджують адекватність запропонованої моделі. Розроблена модель може бути використана як основа для побудови інформаційно-керуючих комплексів фронтальних навантажувачів та інших будівельних машин, здатних забезпечувати ефективне керування робочим обладнанням в умовах невизначеності в реальному часі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фронтальний навантажувач, робоче обладнання, електрогідропривід, система керування, математична модель.

Як цитувати: Кириченко І. Г., Гурко В. О. Математична модель електрогідроприводу робочого обладнання фронтального навантажувача для інформаційно-керуючого комплексу. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 116-125. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-10>

Вступ

Сучасні будівельні та комунальні галузі немислимі без використання спеціальних машин, робоче обладнання яких приводиться в дію гідроприводом. Перевагами гідроприводу є висока питома потужність, можливість реалізації великих зусиль на робочому обладнанні, а також плавне безступінчасте регулювання швидкості та зусилля. Типовими представниками таких машин є фронтальні навантажувачі, які широко використовуються для проведення

земляних і вантажно-розвантажувальних робіт. Керують цими машинами оператори, узгоджуючи кілька рухів одночасно. Такий спосіб керування вимагає значних психофізіологічних витрат (оператор виконує до 1200 рухів на годину) і при тривалій роботі призводить до втоми, підвищуючи ризик помилкових дій. Це знижує продуктивність машини, збільшує знос її вузлів і механізмів та витрату палива, а також підвищує ризик нещасних випадків і аварій.



У зв'язку з цим актуальним завданням є автоматизація робочих процесів фронтальних навантажувачів з використанням сучасних методів керування та комп'ютерних технологій. Одним з найбільш складних етапів для автоматизації, при цьому, є етап наповнення ковша навантажувача матеріалом.

Для керування різними технічними об'єктами широко використовуються ПД-регулятори. Це обумовлено легкістю їх реалізації та здатністю забезпечити задовільну якість керування в широкому діапазоні режимів роботи. Саме тому першими системами керування робочим обладнанням фронтальних навантажувачів та інших будівельних машин були ПД-регулятори [1].

Однак наявність великої кількості невизначених факторів, пов'язаних із змінними силами взаємодії ковша з ґрунтом, внутрішніми витоками в гідроприводі, варіаціями параметрів робочої рідини тощо, значно знижує ефективність використання ПД-регуляторів [2]. У зв'язку з цим значна кількість досліджень спрямована на підвищення ефективності керування гідроприводом будівельних машин за рахунок застосування методів штучного інтелекту. Існуючі в цьому напрямку роботи можна розділити на дві групи:

1) налаштування або корекція коефіцієнтів ПД-регуляторів за допомогою, наприклад, еволюційних алгоритмів [3 - 5] або нечіткої логіки [6, 7];

2) використання додаткових алгоритмів керування, що дозволяють компенсувати вплив невизначеностей [8 - 12].

Останній підхід видається більш перспективним, оскільки дозволяє адаптувати систему до змінних параметрів і зовнішніх збурень без необхідності повного переналаштування основного регулятора.

Наразі як інструмент побудови інтелектуальних інформаційно-керуючих комплексів фронтальних навантажувачів все більш активно розглядаються методи машинного навчання, зокрема навчання з підкріпленням [13 - 17]. Методи машинного навчання дозволяють працювати з багатовимірними даними, що надходять від різних датчиків, враховувати нелінійну динаміку гідроприводу і мінливі умови взаємодії робочого органу з матеріалом та інші фактори, що важко формалізувати. У навчанні з підкріпленням при цьому керування розглядається як послідовний процес прийняття рішень, в якому стратегія

керування формується з метою максимізації винагороди за ефективні дії. Це дозволяє враховувати не лише миттєву помилку позиціонування, але й інтегральні критерії, що включають енергетичну ефективність, динаміку перехідних процесів і робастність.

Крім того, на відміну від методів, що вимагають заздалегідь підготовлених і розмічених даних, навчання з підкріпленням формує стратегію керування безпосередньо в процесі взаємодії робочого обладнання навантажувача з матеріалом, поступово покращуючи її на основі отриманого досвіду. Це дозволяє адаптувати керування до реальних умов роботи.

Однак навіть у цьому випадку необхідна наявність математичної моделі робочого обладнання навантажувача, включаючи його гідропривід, оскільки вона дозволяє коректно сформулювати функцію винагороди, врахувати фізичні обмеження на керуючі впливи, а також провести імітаційне навчання алгоритму керування та верифікацію ефективності навчання до його перенесення на інформаційно-керуючий комплекс навантажувача. При цьому модель повинна достатньо повно описувати процеси, що протікають в гідроприводі і робочому обладнанні навантажувача, і в той же час бути відносно простою. Наявні моделі, наприклад [18], є громіздкими та незручними для використання у реальному часі у бортовому цифровому комп'ютері для цілей керування. У даній роботі пропонується лінеаризована модель електрогідроприводу робочого обладнання фронтального навантажувача, зручна для використання в інформаційно-керуючому комплексі. Метою даної роботи, таким чином, є підвищення ефективності керування робочим обладнанням фронтального навантажувача шляхом розробки математичної моделі електрогідроприводу, зручної для використання в інформаційно-керуючому комплексі машини. Досягнення мети вимагає вирішення наступних завдань: 1) проаналізувати структуру електрогідроприводу робочого обладнання фронтального навантажувача як об'єкта керування в складі інформаційно-керуючого комплексу; 2) розробити математичну модель електрогідроприводу з урахуванням основних фізичних процесів; 3) виконати лінеаризацію моделі та подати її у вигляді, зручному для використання в інформаційно-керуючому комплексі; 4) шляхом імітаційного моделювання підтвердити адекватність отриманої моделі.

Структура системи керування електрогідроприводом

Перед побудовою математичної моделі електрогідроприводу розглянемо її структуру. Оскільки структура приводів стріли і ковша подібна, а процеси, що в них відбуваються, базуються на однакових принципах, то для побудови математичної моделі далі розглядається електрогідропривід ковша (рис. 1). Модель приводу стріли є аналогічною.

Керуючий сигнал, що формується системою керування, перетворюється на струм і та використовується для керування електрогідравлічним пропорційним розподільником, електромагніт якого перетворює електричний сигнал на переміщення золотника, забезпечуючи регулювання витрати робочої рідини в порожнинах гідроциліндра (рис. 1). В результаті змінюються витрати робочої рідини Q_1 і Q_2 , що надходить до поршневої і штокової порожнин гідроциліндра, що призводить до переміщення штока y .

Переміщення штока y реєструється за допомогою датчика лінійного переміщення. У гідравлічній системі встановлено два датчики для вимірювання тиску в поршневій і штоковій порожнинах гідроциліндра p_1 і p_2 . Тиск подачі p_s приймається постійним, а тиск у лінії зливу p_o приймається рівним нулю. Втрати тиску в трубопроводах, в'язкісні ефекти і тертя не моделюються і надалі розглядаються як невизначені фактори.

Структура системи керування рухом ковша показана на рис. 2. Оскільки керування реалізується за допомогою

цифрової техніки, то всі сигнали системи розглядаються в дискретному часі, де k позначає номер такту дискретизації. На вхід головного комп'ютера подається задана траєкторія ковша $q_d(k)$. У головному комп'ютері реалізуються алгоритми формування керуючих впливів і рішення зворотної задачі кінематики, в результаті чого формується бажане переміщення штока гідроциліндра $y_d(k)$. Сформоване завдання передається в контролер цифрової обробки сигналів (КОС).

У контролері КОС на основі сигналу завдання $y_d(k)$ і вимірюного переміщення $y(k)$ реалізується контур регулювання, в результаті чого формується керуючий струм $i(k)$, що подається на електрогідравлічний пропорційний розподільник. Переміщення золотника забезпечує регулювання витрати робочої рідини $Q_1(k)$, $Q_2(k)$, що призводить до зміни тиску $p_1(k)$, $p_2(k)$ в порожнинах гідроциліндра і переміщення штока $y(k)$. Переміщення штока перетворюється в рух ковша, формуючи фактичну його траєкторію $q(k)$.

Сигнали датчика лінійного переміщення і датчиків тиску передаються в КОС і використовуються для оцінки поточного стану системи і вироблення керуючих впливів. Інформація щодо переміщення штока $y(k)$ використовується для формування керуючого струму $i(k)$, у той час як зворотний зв'язок за тиском робочої рідини (відповідний контур на рис. 2 не відображено).

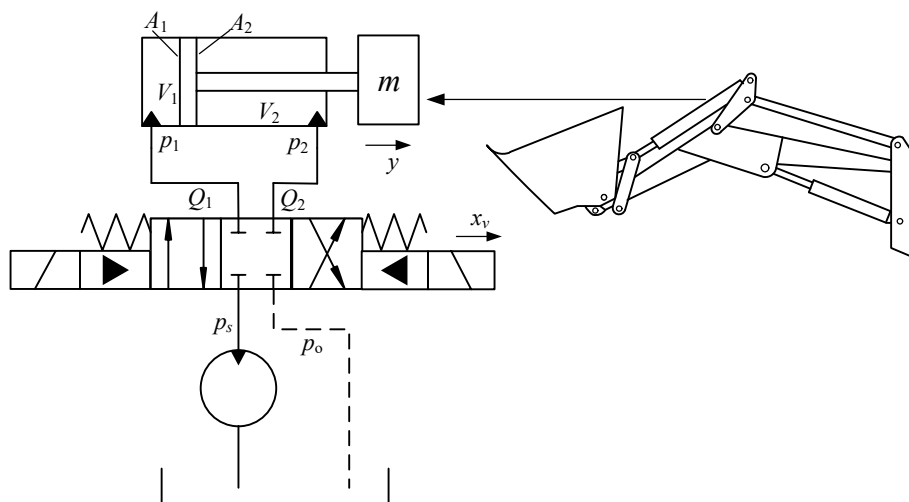


Рис. 1 – Схема електрогідроприводу ковша фронтального навантажувача
Fig. 1 – Schematic of the electrohydraulic drive of a wheel loader bucket

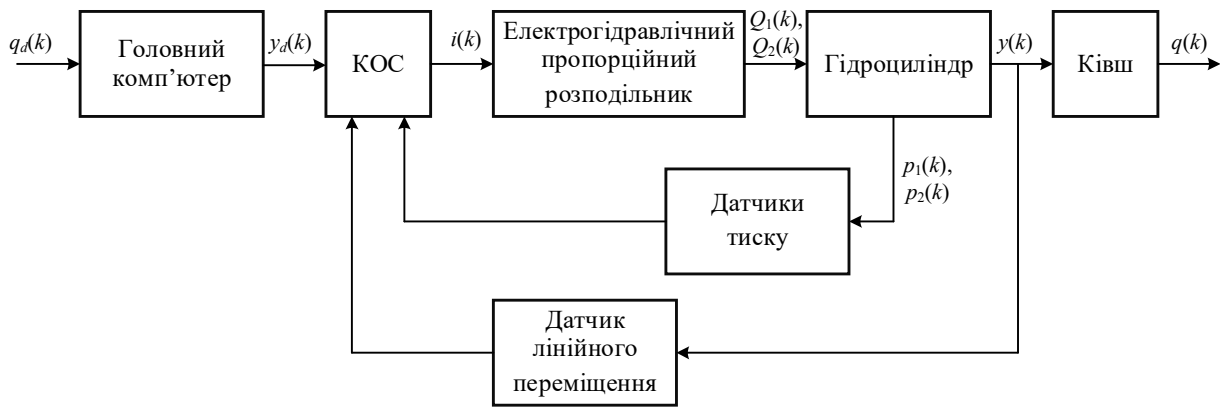


Рис. 2 – Структура системи керування ковшем навантажувача

Fig. 2 – Control system structure of a wheel loader bucket

Модель електрогідроприводу

Розглянемо рівняння динаміки описаної вище системи. Оскільки гідропривід є безперервною динамічною системою, його поведінка описується диференціальними рівняннями в безперервному часі t . Узгодження рівнянь у безперервному часі t та дискретному часі k буде виконано у подальших дослідженнях під час синтезу системи керування робочим обладнанням навантажувача.

Керуючий струм $i(t)$, що формується КОС, створює електромагнітну силу $F_m(t)$, яка приводить золотник електрогідравлічного пропорційного розподільника до руху. Якщо позначити переміщення золотника розподільника відносно нейтрального положення через $x_v(t)$, а в якості позитивного напрямку руху прийняти напрямок, що відповідає збільшенню прохідного перетину вікон золотника в напрямку подачі робочої рідини в поршневу порожнину гідроциліндра, то динаміку золотника можна описати наступним рівнянням другого порядку:

$$m_v \ddot{x}_v(t) + b_v \dot{x}_v(t) + k_v(l_0 + x_v(t)) + k_f x_v(t) = k_m i(t), \quad (1)$$

де $b_v \dot{x}_v(t)$ – сила в'язкого тертя; $k_v(l_0 + x_v(t))$ – сила центруючої пружини золотника; l_0 – попереднє підтискання центруючої пружини; $k_f x_v(t)$ – гідродинамічна сила потоку робочої рідини через вікна розподільника; b_v , k_v , k_f , k_m – відповідні коефіцієнти пропорційності.

Далі розглянемо динаміку системи в околиці робочої точки, що відповідає нейтральному положенню золотника розподільника. У цьому випадку постійна

складова сили $k_v l_0$, обумовлена попереднім підтисканням центруючої пружини, може бути компенсована статичним керуючим впливом. Тому в подальшому l_0 не враховується.

Переміщення золотника призводить до зміни площі прохідних перерізів вікон. У разі невеликих переміщень x_v золотника відносно середнього положення витрати через вікна розподільника можна вважати лінійними [19], і за умови прийнятого вище припущення щодо $p_o = 0$, вони дорівнюють:

$$\begin{cases} Q_1(t) = k_q x_v(t) - k_p p_1(t), \\ Q_2(t) = k_q x_v(t) + k_p p_2(t), \end{cases} \quad (2)$$

де k_q – коефіцієнт витрати робочої рідини через вікна золотника; k_p – коефіцієнт впливу тиску в порожнинах гідроциліндра на витрату робочої рідини.

Зміна витрат $Q_1(t)$ і $Q_2(t)$ призводить до зміни тисків $p_1(t)$ і $p_2(t)$ в порожнинах гідроциліндра. З урахуванням стисливості робочої рідини динаміка тисків описується наступним чином:

$$\begin{cases} \dot{p}_1(t) = \frac{\beta}{V_{01} + A_1 y(t)} (Q_1(t) - A_1 \dot{y}(t)), \\ \dot{p}_2(t) = \frac{\beta}{V_{02} - A_2 y(t)} (-Q_2(t) + A_2 \dot{y}(t)), \end{cases} \quad (3)$$

де β – модуль об'ємної пружності робочої рідини; A_1 , A_2 – ефективні площі поршня з боку поршневої та штокової порожнин гідроциліндра; V_{01} , V_{02} – початкові об'єми порожнин гідроциліндра.

Для спрощення моделі будемо вважати, що зміна об'ємів порожнин гідроциліндра є малою порівняно з їх

початковим значенням. У цьому випадку, (3) можна переписати як:

$$\begin{cases} \dot{p}_1(t) = \frac{\beta}{V_{01}}(Q_1(t) - A_1 \dot{y}(t)), \\ \dot{p}_2(t) = \frac{\beta}{V_{02}}(-Q_2(t) + A_2 \dot{y}(t)). \end{cases} \quad (4)$$

У реальних умовах роботи машини зміна об'ємів поршневої та штокової порожнин може бути значною і порівнянною з їх початковими значеннями. У цьому випадку прийняте припущення про незначність їхньої зміни призводить до появи невизначеності в математичній моделі системи. Передбачається, що пропонуваній інтелектуальний інформаційно-керуючий комплекс здатний забезпечувати необхідну якість керування за наявності таких невизначеностей.

Тиски $p_1(t)$ і $p_2(t)$ створюють сили $A_1 p_1(t)$ і $A_2 p_2(t)$, що діють на поршень гідроциліндра. Відповідно, переміщення штока гідроциліндра описується рівнянням:

$$m \ddot{y}(t) = A_1 p_1(t) - A_2 p_2(t) - F_f(t) - F_L(t), \quad (5)$$

де m – приведена до штока гідроциліндра маса рухомих елементів робочого обладнання (рис. 1);

$F_f(t) = b \dot{y}(t) + c y(t)$ – сила тертя в гідроциліндрі та шарнірних з'єднаннях робочого обладнання; b і c – коефіцієнти в'язкого демпфування та жорсткості відповідно; $F_L(t)$ – зовнішнє навантаження, обумовлене взаємодією робочого обладнання з матеріалом.

Для цілей керування, отримані вище

рівняння (1) – (5) зручно представити у формі простору станів у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку. Введемо наступні змінні стану системи: $x_1(t) = x_v(t)$, $x_2(t) = \dot{x}_v(t)$, $x_3(t) = \Delta p_1(t)$, $x_4(t) = \Delta p_2(t)$, $x_5(t) = y(t)$, $x_6(t) = \dot{y}(t)$, де $\Delta p_1(t)$ і $\Delta p_2(t)$ прирости тиску у відповідних порожнинах гідроциліндра. Керуючим впливом системи є струм, $u(t) = i(t)$. Тоді, з урахуванням прийнятих вище припущень, отримаємо наступну лінійну модель динаміки системи в просторі станів:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{1}{m_v} \left(-(k_v + k_f) x_1(t) - b_v x_2(t) + k_m u(t) \right), \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{\beta}{V_{01}} \left(k_q x_1(t) - k_p x_3(t) - A_1 x_6(t) \right), \\ \dot{x}_4(t) &= \frac{\beta}{V_{02}} \left(-k_q x_1(t) - k_p x_4(t) + A_2 x_6(t) \right), \\ \dot{x}_5(t) &= x_6(t), \\ \dot{x}_6(t) &= \frac{1}{m} \left(A_1 x_3(t) - A_2 x_4(t) - c x_5 - b x_6 - w(t) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

де $w(t)$ – сумарне зовнішнє збурення, обумовлене дією $F_L(t)$ та інших невизначених факторів.

Вихідними змінними системи є переміщення штока гідроциліндра і тиск в його порожнинах (рис. 2): $y_{out}(t) = [x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t)]^T$.

Таким чином, отримано лінеаризовану модель шостого порядку, що описує динаміку електрогідравлічного приводу робочого обладнання навантажувача.

Результати моделювання

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі (6) вона була реалізована в середовищі Simulink пакета MATLAB. Значення параметрів електрогідравлічного приводу, які виходили при моделюванні, наведені в таблиці 1.

Моделювання проводилося за нульових початкових умов, тобто значення всіх координат стану $x(0) = 0$. В якості вхідного впливу $u(t)$ прийнято прямокутний імпульс з одиничною амплітудою і тривалістю 0,25 с, що відповідає режиму включення/відключення електрогідравлічного пропорційного розподільника і дозволяє

оцінити динаміку розімкнутої системи керування.

Результати моделювання відображені на рис. 3 – 6. Рис. 3 показує перехідні процеси в електрогідравлічному розподільнику. Змінна $x_1(t)$ (переміщення золотника) має перерегулювання близько 16% після зміни керуючого сигналу (рис. 3а) і швидко встановлюється на рівні приблизно 0,1 мм. При відключенні струму в момент $t = 0,25$ с золотник після невеликого відхилення з амплітудою приблизно 0,017 мм повертається до нейтрального. Швидкість золотника $x_2(t)$ повністю відповідає його переміщенню (рис. 3б).

Таблиця 1
Значення параметрів електрогідроприводу
Table 1
Values of electrohydraulic drive parameters

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання	Значення
Модуль об'ємної пружності робочої рідини, β [МПа]	1050	Маса рухомих частин золотника гідророзподільника, m_v [кг]	1
Ефективна площа поршневої порожнини гідроциліндра, A_1 [мм ²]	1963,50	Коефіцієнт витрати гідророзподільника, k_q [м ² /с]	2,5
Ефективна площа штокової порожнини гідроциліндра, A_2 [мм ²]	945,62	Коефіцієнт внутрішніх витоків у гідросистемі, k_p [м ³ /(с·Па)]	$3 \cdot 10^{-11}$
Початковий об'єм поршневої порожнини гідроциліндра, V_{01} [м ³]	$2,95 \cdot 10^{-4}$	Коефіцієнт в'язкого тертя золотника, b_v [Н·с/м]	120,5
Початковий об'єм штокової порожнини гідроциліндра, V_{02} [м ³]	$1,42 \cdot 10^{-4}$	Коефіцієнт в'язкого демпфування руху штока гідроциліндра, b [Н·с/м]	700
Приведена маса робочого обладнання, m [кг]	100	Коефіцієнт підсилення керуючого струму, k_m [Н/А]	1,52

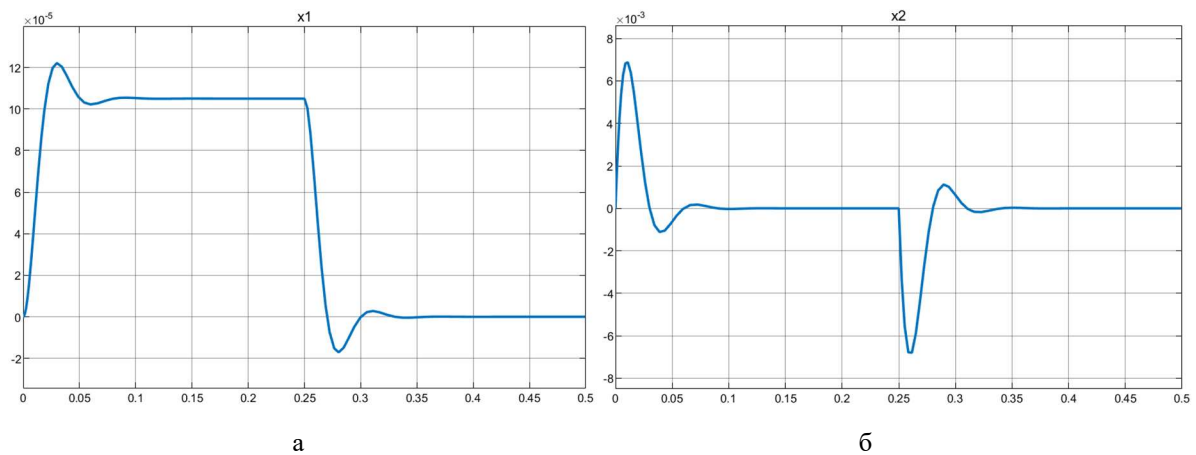


Рис. 3 – Перехідні процеси в електрогідрравлічному розподільнику
Fig. 3 – Transient processes in the electrohydraulic control valve

Вид перехідних процесів у електрогідрравлічному розподільнику повністю відповідає поведінці динамічної системи 2-го порядку, узгоджується з власними динаміч-

ними властивостями золотника і підтверджує адекватність перших двох рівнянь у (6).

Рис. 4 відображає зміну тисків $x_3(t)$, $x_4(t)$ в порожнинах гідроциліндра.

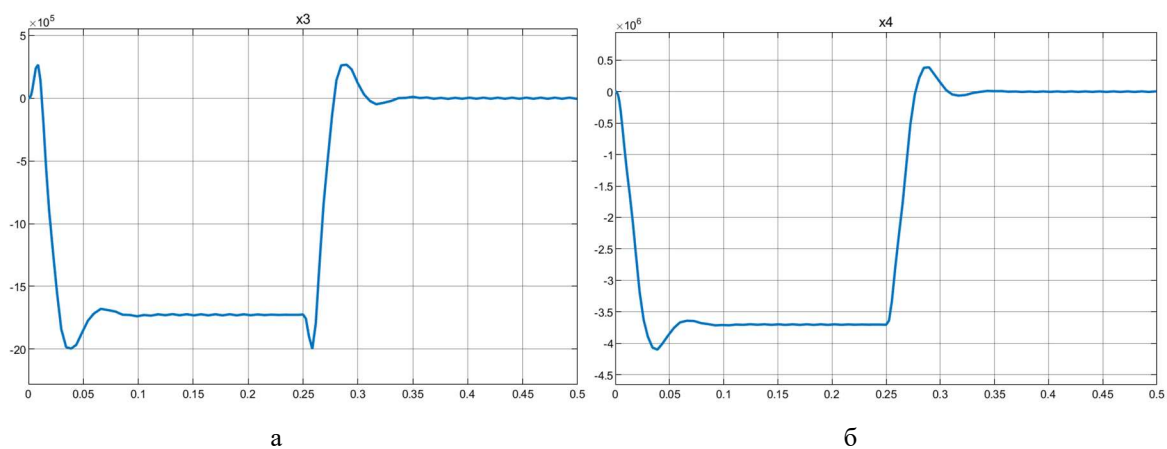


Рис. 4 – Зміна тисків в порожнинах гідроциліндра
Fig. 4 – Pressure changes in the chambers of the hydraulic cylinder

Зміна значення керуючого струму призводить до виникнення затухаючого коливального процесу під час зміни тиску в поршневій та штоковій порожнинах гідроциліндра (рис. 4). Такий характер перехід-

ного процесу зумовлений витратними характеристиками золотника, а також стисливістю робочої рідини в гідравлічній системі.

Параметри руху штока гідроциліндра $x_5(t)$ та $x_6(t)$ показано на рис. 5.

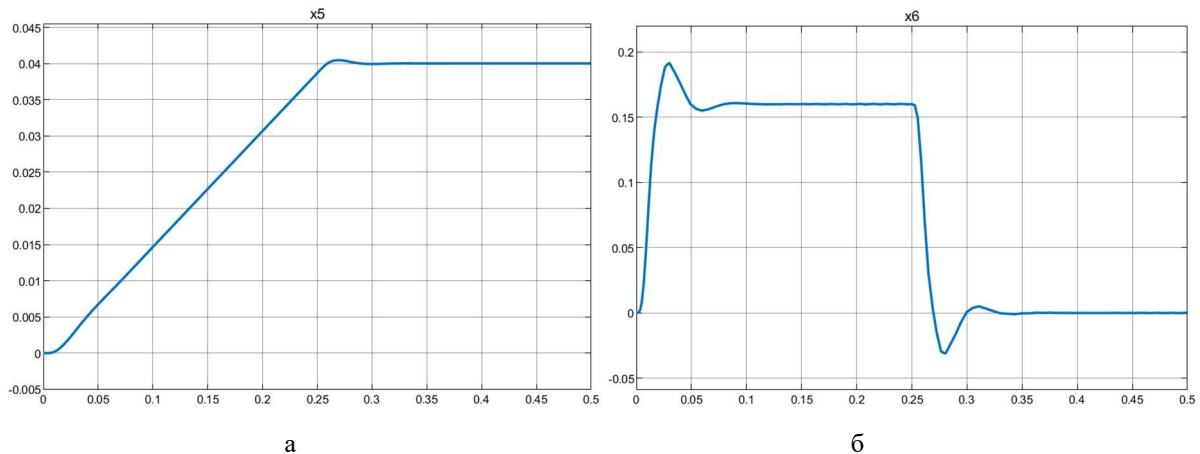


Рис. 5 – Параметри руху штока гідроциліндра
Fig. 5 – Parameters of the hydraulic cylinder rod motion

Швидкість штока $x_6(t)$ після короткочасного перехідного процесу з перерегулюванням 18% встановлюється на рівні близько 160 мм/с. Під час руху штока зі сталою швидкістю його переміщення $x_5(t)$ збільшується майже лінійно і досягає приблизно 40 мм з незначним перерегулюванням (менше 1%). Після відключення струму в момент $t = 0,25$ с швидкість штока після незначних коливань зменшується до нуля. Стале значення

положення штока $x_5(t)$ зумовлене перекриттям каналів гідророзподільника в нейтральному положенні золотника (рис. 4а).

Наведені вище результати моделювання свідчать про відповідність запропонованої моделі (б) фізичній сутності електрогідравлічного привода робочого обладнання фронтального навантажувача та водночас є зручними для використання в інформаційно-керуючому комплексі.

Висновки

У роботі розглянуто електрогідропривід робочого обладнання фронтального навантажувача в умовах невизначеності параметрів і зовнішніх впливів. Проаналізовано структуру системи керування електрогідроприводом, яка вико ристана як основа для побудови математичної моделі. Розроблено лінеаризовану математичну модель, орієнтовану на використання в задачах керування, подану у просторі станів у вигляді системи з шести диференціальних рівнянь першого порядку.

Адекватність моделі підтверджено результатами імітаційного моделювання. Запропонована модель може бути вико ристана як основа для синтезу алгоритмів керування та побудови інформаційно-керуючих комплексів будівельних машин.

Подальші дослідження будуть спрямовані на синтез системи керування електрогідроприводом, здатної забезпечити належну якість руху робочого обладнання навантажувача навіть за наявності невизначеностей у запропонованій моделі.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation / A. J. Koivo et al. *Aerospace Engineering*. 1996. Vol. 9, no. 1. P. 10–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1996\)9:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1996)9:1(10))
2. Dadhich S., Bodin U., Andersson U. Key challenges in automation of earth-moving machines. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 68. P. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>
3. Samakwong T., Assawinchaichote W. PID Controller Design for Electro-hydraulic Servo Valve System with Genetic Algorithm. *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 86. P. 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.023>
4. Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller / H. Feng et al. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 127. P. 103722. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103722>
5. Research on PID Position Control of a Hydraulic Servo System Based on Kalman Genetic Optimization / Y.-Q. Guo et al. *Actuators*. 2022. Vol. 11, no. 6. P. 162. <https://doi.org/10.3390/act11060162>
6. Junpeng Shao, Lihua Chen, Zhibin Sun. The application of fuzzy control strategy in electro-hydraulic servo system. *2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Niagara Falls, Ont., Canada. P. 2010–2016. <https://doi.org/10.1109/icma.2005.1626871>
7. Li Y., Qi L. Optimization of mechanical hydraulic system load adaptation based on fuzzy control algorithm. *International Journal for Housing Science and Its Applications*. 2025. Vol. 46, no. 4. P. 350–360. <https://doi.org/10.70517/ijhsa46430>
8. Skid-Proof Operation of Wheel Loader Based on Model Prediction and Electro-Hydraulic Proportional Control Technology / B. Cao et al. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 81–92. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2961364>
9. GA-optimized feedforward-PID tracking control for a rugged electrohydraulic system design / B. K. Sarkar et al. *ISA Transactions*. 2013. Vol. 52, no. 6. P. 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.07.008>
10. Intelligent Operation of Wheel Loader Based on Electrohydraulic Proportional Control / B.-w. Cao et al. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/1730946>
11. Actuation of an electrohydraulic manipulator with a novel feedforward compensation scheme and PID feedback in servo-proportional valves / A. Sarkar et al. *Control Engineering Practice*. 2023. Vol. 135. P. 105490. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105490>
12. Torque-adaptive resistance-reducing shoveling strategy for loaders / B. Cao et al. *Ain Shams Engineering Journal*. 2026. Vol. 17, no. 1. P. 103845. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103845>
13. Reinforcement Learning with World Models for Autonomous Excavation Optimization in Wheel Loaders / D. Morais et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2025. Vol. 59, no. 29. P. 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.12.184>
14. Azulay O., Shapiro A. Wheel Loader Scooping Controller Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 24145–24154. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056625>
15. Data-Driven Reinforcement-Learning-Based Automatic Bucket-Filling for Wheel Loaders / J. Huang et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 19. P. 9191. <https://doi.org/10.3390/app11199191>
16. Field test of neural-network based automatic bucket-filling algorithm for wheel-loaders / S. Dadhich et al. *Automation in Construction*. 2019. Vol. 97. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.013>
17. Мірошник В. А., Гурко В. О., Гурко О. Г. Використання навчання з підкріпленням для планування шляху будівельного робота. *Біоніка інтелекту*. 2024. № 2 (101). С. 34–38. [https://doi.org/10.30837/bi.2024.2\(101\).05](https://doi.org/10.30837/bi.2024.2(101).05)
18. Піонткевич О. В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 2. С. 83–90.
19. Niksefat N, Sepehri N. Designing robust force control of hydraulic actuators despite system and environmental uncertainties. *IEEE Control Systems Magazine*. 2001. Vol. 21, no. 2. P. 66–77. <https://doi.org/10.1109/37.918266>

Отримано: 19.03.2026 / Переглянуто: 24.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**KYRYCHENKO I.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction and Road Machinery named after A. M. Kholodov

e-mail: igk160450@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2128-3500>

¹**HURKO V.**, Postgraduate Student of the Department of Construction and Road Machinery named after A. M. Kholodov

e-mail: volgurko@khadi.kharkov.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9216-6682>

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University
Yaroslava Mudrogo str. 25,61002, Kharkiv, Ukraine*

MATHEMATICAL MODEL OF THE ELECTRO-HYDRAULIC DRIVE OF THE WORKING EQUIPMENT OF A WHEEL LOADER FOR AN INFORMATION AND CONTROL SYSTEM

The control of a wheel loader's working equipment is characterized by a significant number of uncertainties arising from variable interaction conditions between the bucket and the material, internal leaks in the hydraulic system, compressibility of the working fluid, as well as the influence of external loads and variations in the parameters of the actuator components during operation. These uncertainties complicate the development of adequate mathematical models and reduce the efficiency of the automatic control system for the working equipment, since the model fails to reflect the actual system dynamics accurately.

The aim of this study is to improve the efficiency of wheel loader working equipment control by developing a mathematical model of the electro-hydraulic actuator that is suitable for implementation in the machine's information and control system. The study employs methods of mathematical modelling of dynamic systems and linearization of nonlinear equations, with the resulting model represented in state space. The model was developed based on the structure of the electrohydraulic actuator control system, accounting for the principal physical processes in the actuator.

A linearized mathematical model of the electro-hydraulic actuator was obtained and represented in state space as a system of six first-order differential equations. The simulation results in MATLAB/Simulink are in good agreement with the physical processes in the electro-hydraulic actuator of the wheel loader's working equipment and confirm the adequacy of the proposed model.

The developed model can serve as a basis for designing information and control systems for wheel loaders and other construction machinery, enabling effective real-time control of the working equipment under conditions of uncertainty.

Keywords: wheel loader, working equipment, electrohydraulic actuator, control system, mathematical model.

In cites: Kyrychenko I., Hurko V. (2026). Mathematical model of the electro-hydraulic drive of the working equipment of a wheel loader for an information and control system. *Engineering*, (37), 116-125. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-10> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Koivo, AJ, Thoma, M, Kocaoglan, E & Andrade-Cetto, J 1996, 'Modeling and Control of Excavator Dynamics during Digging Operation', *Journal of Aerospace Engineering*, no 9(1), Pp. 10–18. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(1996\)9:1\(10\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1996)9:1(10))
2. Dadhich, S, Bodin, U & Andersson, U 2016, 'Key challenges in automation of earth-moving machines', *Automation in Construction*, no 68, Pp. 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.05.009>
3. Samakwong, T & Assawinchaichote, W 2016, 'PID Controller Design for Electro-hydraulic Servo Valve System with Genetic Algorithm', *Procedia Computer Science*, no 86, Pp. 91–94. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.023>
4. Feng, H, Ma, W, Yin, C & Cao, D 2021, 'Trajectory control of electro-hydraulic position servo system using improved PSO-PID controller', *Automation in Construction*, no 127, 103722. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103722>

5. Guo, YQ, Zha, XM, Shen, YY, Wang, YN & Chen, G 2022, 'Research on PID Position Control of a Hydraulic Servo System Based on Kalman Genetic Optimization', *Actuators*, no **11**(6), Pp. 162. <https://doi.org/10.3390/act11060162>
6. Junpeng Shao, Lihua Chen & Zhibin Sun, 2005, 'The application of fuzzy control strategy in electro-hydraulic servo system', In: *2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls, Ont., Canada*. <https://doi.org/10.1109/icma.2005.1626871>
7. Li Y & Qi L 2025, 'Optimization of mechanical hydraulic system load adaptation based on fuzzy control algorithm', *International Journal for Housing Science and Its Applications*, no **46**(4), Pp. 350–360. <https://doi.org/10.70517/ijhsa46430>
8. Cao, B, Liu, X, Chen, W, Yang, K & Tan, P 2020, 'Skid-Proof Operation of Wheel Loader Based on Model Prediction and Electro-Hydraulic Proportional Control Technology', *IEEE*, iss **8**, Pp. 81–92. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2961364>
9. Sarkar, B, Mandal, P, Saha, R, Mookherjee, S & Sanyal, D 2013, 'GA-optimized feedforward-PID tracking control for a rugged electrohydraulic system design', *ISA Transactions*, no **52**(6), Pp. 853–861. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2013.07.008>
10. Cao, B-w, Liu, X-h, Chen, W, Tan, P & Niu, P-f 2020, 'Intelligent operation of wheel loader based on electrohydraulic proportional control', *Mathematical Problems in Engineering*, Pp. 1–11. <https://doi.org/10.1155/2020/1730946>
11. Sarkar, A, Maji, K, Chaudhuri, S, Saha, R, Mookherjee, S & Sanyal, D 2023, 'Actuation of an electrohydraulic manipulator with a novel feedforward compensation scheme and PID feedback in servo-proportional valves', *Control Engineering Practice*, no **135**, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105490>
12. Cao, B, Guo, R, Zhao, D, Li, Q & Liu, X 2026. 'Torque-adaptive resistance-reducing shoveling strategy for loaders', *Ain Shams Engineering Journal*, no **17**(1), 103845. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103845>
13. Morais, D, Habbab, A, Fatima, SB & Proutiere, A 2025, 'Reinforcement learning with world models for autonomous excavation optimization in wheel loaders', *IFAC-PapersOnLine*, no **59**(29), Pp. 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2025.12.184>
14. Azulay, O & Shapiro, A 2021, 'Wheel loader scooping controller using deep reinforcement learning', *IEEE Access*, no **9**, Pp. 24145–24154. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056625>
15. Huang, J, Kong, D, Gao, G, Cheng, X & Chen, J 2021, 'Data-Driven reinforcement-learning-based automatic bucket-filling for wheel loaders', *Applied Sciences*, no **11**(19), 9191. <https://doi.org/10.3390/app11199191>
16. Dadhich, S, Sandin, F, Bodin, U, Andersson, U & Martinsson, T 2019, 'Field test of neural-network based automatic bucket-filling algorithm for wheel-loaders', *Automation in Construction*, no **97**, Pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.013>
17. Miroshnyk, VA, Hurko, VO & Gurko, OG 2024, 'Vykorystannia navchannia z pidkriplenniam dlia planuvannia shliakhu budivelnogo robota' [The use of reinforcement learning to plan the path of a construction robot], *Bionics of Intelligence*, no **2**(101), Pp. 34–38. [https://doi.org/10.30837/bi.2024.2\(101\).05](https://doi.org/10.30837/bi.2024.2(101).05) (in Ukraine)
18. Piontkevych, OV 2015, 'Matematychna model hidropryvodu frontalnoho navantazhuvacha z halmivnym klapanom' [Mathematical model of front loader hydraulic drive with brake valve], *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, no **2**, Pp. 83-90 (in Ukraine).
19. Designing robust force control of hydraulic actuators despite system and environmental uncertainties, 2001, *IEEE Control Systems Magazine*, no **21**(2), Pp. 66–77. <https://doi.org/10.1109/37.918266>

Submission received: 03.19.2026/Revised: 04.24.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-11>
УДК 629.01

¹О. С. ПИСАРЦОВ, кандидат технічних наук
доцент кафедри автомобілів ім.А.Б.Гредескула
e-mail: alex.pisartsov@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4661-5441>
¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЛІТНІХ І ЗИМОВИХ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ТИПОРОЗМІРУ 225/55 R18 ЗАЛЕЖНО ВІД ВНУТРІШНЬОГО ТИСКУ

Оптимізація взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею є однією з ключових умов забезпечення ефективності, стійкості та безпеки руху автомобіля. У сучасних умовах експлуатації, коли транспортні засоби часто використовуються як на твердих дорогах, так і на слабких або нестабільних поверхнях, зростає потреба у науково обґрунтованому підході до регулювання внутрішнього тиску в шинах.

У межах роботи виконано порівняння взаємозв'язку між внутрішнім тиском у літніх шинах Michelin Primacy 3 та зимових шинах Triangle Snowlink PL01 типорозміру 225/55 R18 та величиною контактного тиску, що передається транспортним засобом на опорну поверхню. Оптимізація тиску в шинах є ключовим чинником підвищення прохідності, зменшення навантаження на дорожнє покриття та поліпшення керованості, особливо за умов руху по м'яких, нерівних або слабонесучих поверхнях (пісок, сніг, болотистий ґрунт тощо).

У дослідженні також проаналізовано можливі способи впливу на контактний тиск та запропоновано практичні заходи, спрямовані на підвищення показників прохідності. Основною метою роботи було визначення закономірності зміни тиску на контактну поверхню у літніх та зимових шинах залежно від їх внутрішнього тиску.

Експериментальні випробування проводилися відповідно до розробленої методики на автомобілі категорії M1 з підвищеними позашляховими характеристиками — Opel Grandland 1.5 BHDi. Тестування здійснювалося на рівній бетонній поверхні із застосуванням літніх шин Michelin Primacy 3 та зимових шин Triangle Snowlink PL01 типорозміру 225/55 R18.

Отримані експериментальні дані дозволяють стверджувати, що сезонні типи шин відрізняються не лише рисунком протектора чи твердістю гумової суміші, а й характером їхньої механічної взаємодії з опорною поверхнею під навантаженням. Ці відмінності визначають ефективність шин у відповідних кліматичних та дорожніх умовах, а також підтверджують необхідність обґрунтованого вибору шин із урахуванням сезонності, режимів експлуатації, типу дорожнього покриття та вимог до прохідності й безпеки руху.

Представлені у статті графічні залежності шин для різних кліматичних умов наочно підтверджують ефективність та інженерну доцільність зниження внутрішнього тиску в шинах під час експлуатації транспортних засобів у складних дорожніх та позашляхових умовах. Продемонстровані результати свідчать, що зимові та літні пневматичні шини демонструють принципово різний характер деформаційних процесів та специфіку взаємодії з опорною поверхнею навіть за однакових зовнішніх умов та одного й того ж діапазону зміни внутрішнього тиску. Виявлені відмінності зумовлені сукупністю конструктивних, матеріальних та експлуатаційних чинників, які визначають механічну відповідь шин різного сезонного призначення під дією навантаження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: тиск на опорну поверхню, тиск у шині, площа плями контакту, прохідність, шини.

Як цитувати: Писарцов О.С. Порівняльне дослідження характеристик опорної взаємодії літніх і зимових пневматичних шин типорозміру 225/55 R18 залежно від внутрішнього тиску. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 126-136. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-11>



Вступ

Ефективність експлуатації сучасних автомобілів значною мірою визначається параметрами контакту пневматичної шини з опорною поверхнею. Площа контактної плями, її форма та розподіл тиску впливають на такі ключові характеристики транспортного засобу, як стійкість, керуваність, гальмівні властивості, паливна економічність та рівень зносу шин. Одним із найбільш доступних та водночас дієвих способів регулювання параметрів контакту шини з дорогою є зміна внутрішнього тиску в шині.

Разом із тим конструктивні особливості шин різного сезонного призначення — літніх та зимових — суттєво відрізняються. Вони мають різну жорсткість каркаса, еластичність гумової суміші, глибину та конфігурацію протектора. Це зумовлює неоднакову реакцію шин на зміну тиску і, відповідно, формує різні величини питомого тиску на опорну поверхню. Незважаючи на значну кількість робіт, присвячених дослідженню

контактних характеристик шин, комплексний порівняльний аналіз впливу тиску на параметри контактної плями саме для літніх і зимових шин одного розміру залишається недостатньо висвітленим.

У сучасних умовах експлуатації, коли автомобілі використовуються протягом року у змінних дорожніх і кліматичних ситуаціях, науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимального тиску в залежності від типу шини набувають особливої практичної значущості. Рациональне регулювання тиску дозволяє підвищити рівень безпеки руху, зменшити енергетичні витрати автомобіля, підвищити прохідність на слабких поверхнях та продовжити ресурс шин.

У цьому контексті порівняльні дослідження характеристик контакту літніх і зимових шин при різних значеннях внутрішнього тиску є актуальним напрямом, який сприяє удосконаленню підходів до технічної експлуатації автотранспорту. Саме цим визначається необхідність проведення даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання впливу внутрішнього тиску в пневматичній шині на параметри контактної взаємодії з опорною поверхнею досить широко розглядається у вітчизняних та зарубіжних дослідженнях. Значна кількість робіт [1–14] присвячена визначенню залежності між величиною тиску та площею контактної плями, яка визначає ступінь навантаження на дорожнє покриття, зчепні властивості та енергетичні параметри руху автомобіля. У публікаціях останніх років демонструється стабільна закономірність: зі зниженням внутрішнього тиску площа контакту зростає, що призводить до зменшення питомого тиску на опорну поверхню. Однак інтенсивність цих змін суттєво залежить від конструкції шини, її жорсткісних характеристик та сезонного призначення.

У сучасних роботах активно застосовуються експериментальні методики визначення площі контактної плями, серед яких найбільш поширеними є оптичні стенди та методи фотографічної фіксації відбитку. Такі підходи дозволяють отримати достовірні дані щодо форми та

розмірів зони контакту у статичних умовах. Поряд із цим проводяться дослідження, засновані на чисельному моделюванні, що дозволяють аналізувати розподіл нормальних напружень у шині з урахуванням її деформацій та зміни зовнішніх факторів, таких як швидкість руху, температура чи динамічне навантаження. Проте застосування чисельних моделей потребує подальшої верифікації результатів у реальних умовах експлуатації.

Окремим напрямом є порівняльні дослідження літніх та зимових шин одного типорозміру. Вони показують, що зимові шини завдяки більш м'якій гумовій суміші та підвищеній еластичності боковини демонструють більшу деформацію при однакових змінах тиску порівняно з літніми аналогами. Це впливає на динаміку зміни контактної площі та питомого тиску, що необхідно враховувати при формуванні рекомендацій щодо режимів експлуатації в різні пори року.

У роботах [3, 7] підкреслено існування майже лінійної залежності між навантаженням на колесо, внутрішнім тиском у

шині та розміром контактної плями. Це створює підґрунтя для побудови математичних моделей прогнозування параметрів взаємодії «шина – опорна поверхня» за різних режимів експлуатації. У дослідженнях [13, 14] акцентовано увагу на поглибленому аналізі розподілу контактного тиску, а також на визначальному впливі таких характеристик, як геометрія та рисунок протектора, радіальна та бічна жорсткість шинної оболонки, конструкційні особливості каркаса.

У роботах [15-17] наведено проведені дослідження впливу тиску на опорну поверхню для шин, які будуть порівнюватися у даній статті.

Незважаючи на наявність значної кількості робіт, низка аспектів залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, у більшості публікацій аналіз проводиться

для обмеженої кількості моделей шин або в умовах, далеких від реальної експлуатації. Часто результати отримані на жорстких лабораторних поверхнях, що не дозволяє повною мірою врахувати поведінку шини на слабких або нерівних дорожніх покриттях. Також у літературі відсутні систематизовані порівняльні дані для літніх і зимових шин одного розміру за однакових навантажень і в однакових експериментальних умовах.

Таким чином, проведення порівняльного дослідження впливу внутрішнього тиску на величину питомого тиску для літніх і зимових шин одного типорозміру є актуальним і необхідним для уточнення існуючих закономірностей та формування практичних рекомендацій щодо оптимальних режимів експлуатації автомобільних шин у різні сезони.

Постановка проблеми

Ефективність взаємодії пневматичної шини з опорною поверхнею є ключовим фактором, що визначає прохідність, стійкість та безпеку автомобіля. Тиск на опорну поверхню залежить від площі контакту шини з дорогою, а ця площа змінюється відповідно до внутрішнього тиску в шині та її конструктивних особливостей.

Незважаючи на те, що загальна закономірність — зниження тиску в шині збільшує площу контакту та зменшує тиск на опорну поверхню — є відомою, ступінь цього впливу суттєво відрізняється для шин різних типів (літніх і зимових), які мають різну структуру корду, жорсткість гуми та рисунок протектора. На практиці це означає, що рекомендації щодо регулювання тиску для поліпшення прохідності або зменшення навантаження

на основу не можуть бути універсальними.

Проблема полягає у відсутності порівняльної оцінки впливу тиску у шинах одного розміру, але різного сезонного призначення на тиск опори. Це ускладнює розробку практичних рекомендацій щодо оптимального тиску в шинах для різних дорожніх і кліматичних умов, особливо у випадках, коли автомобіль експлуатується як на твердих дорогах, так і на слабких або нестабільних поверхнях (сніг, пісок, ґрунт).

Для вирішення цієї проблеми необхідно встановити характер та величину змін тиску на опорну поверхню при зміні внутрішнього тиску в літніх і зимових шинах однакового розміру на однаковому транспортному засобі, що дозволить обґрунтувати оптимальні умови їх експлуатації.

Викладення основного матеріалу

Пневматична шина є складною пружною системою, яка забезпечує реалізацію контактної взаємодії автомобіля з опорною поверхнею, визначає його прохідність, стійкість під час руху, ефективність гальмування та комфорт. Одним із базових параметрів, що характеризують якість цієї взаємодії, є тиск шини на опорну поверхню, який залежить від величини площі контакту та

внутрішнього тиску в шині. Від цієї величини тиску суттєво залежать навантаження на дорожнє покриття, здатність автомобіля долати слабкі ґрунти та стійкість машини в умовах погіршеного зчеплення.

Мінімізація контактного тиску на опорну поверхню є одним із ключових критеріїв при проектуванні позашляхових транспортних засобів, гусеничної техніки та

мобільної інженерної техніки, призначеної для експлуатації на слабких або низьконесучих основах – таких як сипкі піски, заболочені ділянки, снігові покриви та інші нестабільні ґрунти. У цих умовах локалізоване надмірне навантаження призводить до значного занурення опорних елементів у ґрунт, що викликає зниження коефіцієнта зчеплення та втрату тягових характеристик транспортного засобу.

З метою підвищення прохідності та забезпечення стабільної взаємодії з опорною поверхнею виникає необхідність конструктивної оптимізації ходової частини. Одним із ефективних рішень є досягнення максимально можливої площі контактної поверхні при збереженні допустимих масо-габаритних параметрів техніки. Раціональне поєднання масогабаритних характеристик транспортного засобу, геометричних параметрів шин або гусениць та адаптивного регулювання внутрішнього тиску в шинах дозволяє забезпечити ефективне функціонування техніки навіть у складних дорожньо-кліматичних умовах.

Контактний тиск на опорну поверхню визначається базовою залежністю:

$$P = \frac{F}{A}$$

де P — контактний тиск; F — вага транспортного засобу, що діє на опорну поверхню; A — площа контактної плями, через яку передається навантаження.

З формули випливає, що величина тиску на опорну поверхню залежить від двох основних чинників: маси транспортного засобу та геометричних характеристик контактної зони коліс або гусениць із поверхнею. Зі збільшенням маси тиск зростає прямо пропорційно, тоді як розширення площі контактної плями,

навпаки, веде до зменшення питомого тиску на ґрунт.

З урахуванням цієї закономірності, зниження тиску повітря в шині призводить до збільшення площі контакту, що, своєю чергою, зменшує тиск на опорну поверхню та покращує прохідність. Проте ступінь зміни цих параметрів залежить від конструкції та жорсткісних характеристик шини, які різняться для літніх та зимових зразків. Зимові шини мають м'якший склад гуми, збільшену еластичність, інший тип ламелізації, що забезпечує роботу протектора при низьких температурах. Натомість літні шини характеризуються більшою жорсткістю та меншим відхиленням форми під навантаженням. Тому можна очікувати, що однакові зміни внутрішнього тиску в шинах різного сезонного призначення спричиняють різний ефект щодо зміни параметрів їх контакту з опорною поверхнею.

У зв'язку з цим постає необхідність проведення порівняльних досліджень літніх і зимових шин одного розміру за умов варіювання внутрішнього тиску. Такий підхід дозволяє оцінити, наскільки сезонні відмінності впливають на тиск та форму плями контакту, а також визначити оптимальні режими експлуатації шин під час руху різними типами доріг.

Методика та організація дослідження. У дослідженні розглядалися пневматичні шини двох типів: літня та зимова, обидві розміру 225/55 R18, що забезпечує коректність порівняння завдяки однаковим геометричним параметрам. Для виконання експериментів було використано легковий автомобіль Опель Grandland 1,5 BHDi (рис.1) масою 1553 кг, навантажений симетрично, що дозволяє отримати репрезентативні результати, не спотворені зміщенням центра мас



Рис. 1 – Тиск на опорну поверхню транспортного засобу категорії M_1

Fig. 1 – Pressure on the supporting surface of a vehicle of category M_1

Вимірювання площі контакту здійснювалося методом побудови площ контактної плями шляхом фіксації відбитків та подальшої обробки. Тиск усередині шин змінювався із кроком 0,1 бар, що дозволило побудувати залежності площі контакту й тиску від величини внутрішнього тиску.

Основні показники, що визначалися у ході дослідження:

- розміри плями контакту, см;
- площа плями контакту, cm^2 ;
- тиск шини на опорну поверхню, кПа;

Згідно результатів дослідження були отримані діаграми впливу внутрішнього тиску шини на опорну поверхню [17-18] Експериментальні дані свідчать, що площа контакту обох шин зменшується зі збільшенням тиску, проте характер і швидкість цього зменшення відрізняються.

Згідно з аналізом діаграм [17-18], за однакових вхідних умов зимова шина Snowlink PL01 формує вищий контактний тиск на опорну поверхню порівняно з літньою шиною Michelin Primacy 3. Така різниця, ймовірно, зумовлена відмінностями у конструктивній архітектурі каркаса,

жорсткості гумової суміші та конфігурації протектора, що визначають особливості розподілу навантаження у зоні контакту.

Виходячи з цього, доцільним є проведення детального аналізу змін геометричних параметрів контактної плями шини з опорною поверхнею. Для цього планується представлення узагальнених таблиць експериментально виміряних лінійних та площинних характеристик досліджуваних шин. На основі цих даних будуть побудовані відповідні графічні залежності, що дозволять визначити закономірності зміни форми та площі контактної зони.

Такий підхід дає змогу кількісно оцінити вплив конструктивних особливостей шин та режимів навантаження на характер взаємодії з дорожнім покриттям, що, у свою чергу, дозволяє обґрунтовано порівнювати ефективність різних типів шин та робити висновки щодо оптимізації їх експлуатаційних характеристик у різних умовах.

Згідно результатів виміру геометричних розмірів наводимо графіки для літніх шин Michelin Primacy 3 (рис.2) та зимових шин Triangle Snowlink PL01 (рис 3).

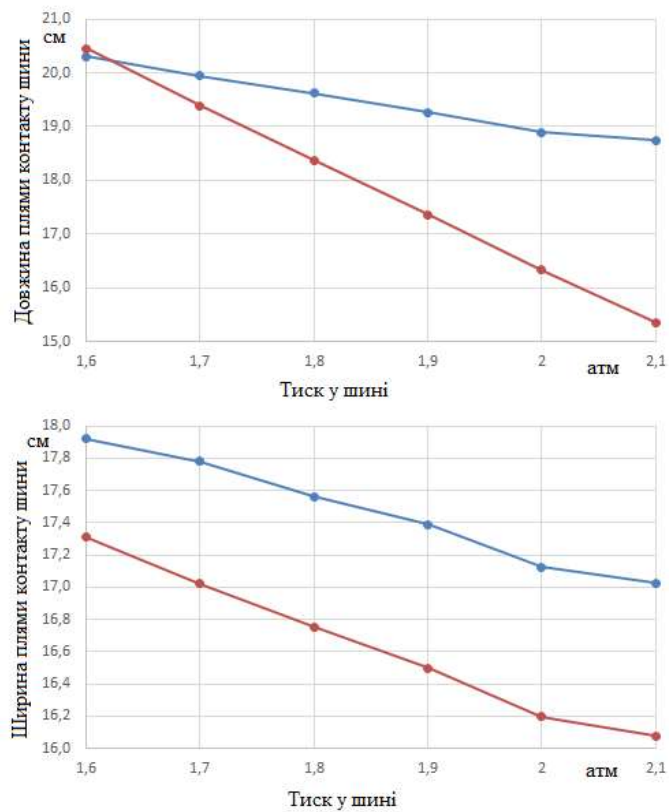


Рис. 2 – Геометричні розміри поверхні контакту літніх шин Triangle Snowlink PL01
Fig. 2 – Geometric dimensions of the contact surface of summer tires Michelin Primacy 3

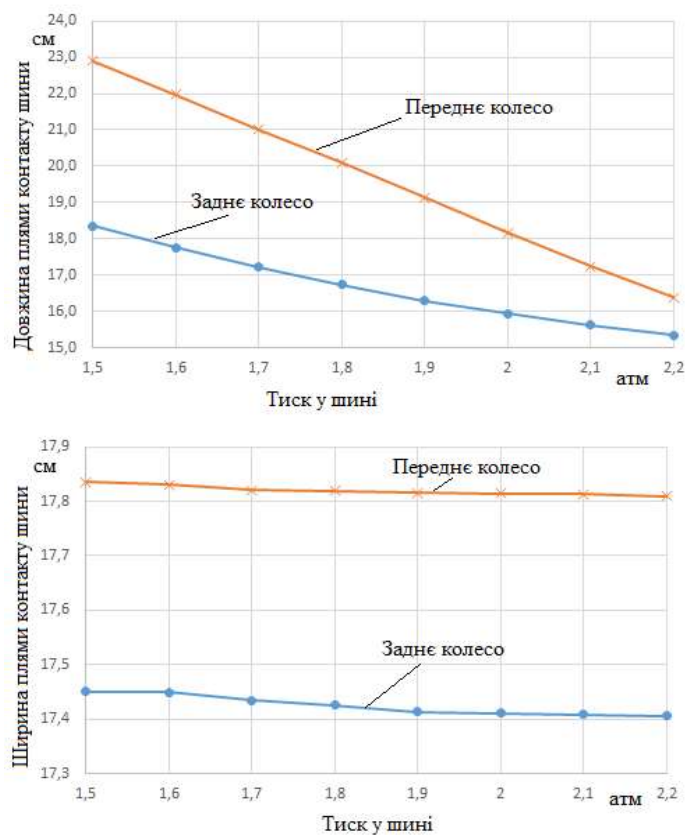


Рис. 3 – Геометричні розміри поверхні контакту зимових шин Triangle Snowlink PL01
Fig. 3 – Geometric dimensions of the contact surface of winter tires Triangle Snowlink PL01

Висновки

Експериментальні дані свідчать, що площа контакту обох шин зменшується зі збільшенням тиску, проте характер і швидкість цього зменшення відрізняються.

Аналіз отриманих графічних залежностей дає змогу констатувати, що зимові та літні пневматичні шини демонструють принципово різний характер деформаційних процесів та специфіку взаємодії з опорною поверхнею навіть за однакових зовнішніх умов та одного й того ж діапазону зміни внутрішнього тиску. Виявлені відмінності зумовлені сукупністю конструктивних, матеріальних та експлуатаційних чинників, які визначають механічну відповідь шин різного сезонного призначення під дією навантаження.

Зокрема, зимова шина Snowlink PL01 під час зниження внутрішнього тиску з 2,2 до 1,5 атм характеризується майже незмінною шириною контактної плями. Така стабільність поперечних деформацій свідчить про високу еластичність гумової суміші, значну кількість ламел, а також про специфічні конструктивні параметри каркаса і боковин, які забезпечують здатність шини ефективно адаптуватися до зменшення тиску без суттєвого збільшення ширини профілю. Водночас відзначається помітне зростання довжини контактної плями, що вказує на подовжній характер деформації каркаса та «розтікання» шини в напрямку дії вертикального навантаження. Таке збільшення довжини контактної зони є фактором підвищення загальної площі контакту, а відтак — покращення зчепних

властивостей на поверхнях із низьким коефіцієнтом адгезії, характерних для зимового періоду (ущільнений сніг, лід, сльота).

На противагу цьому, літня шина Michelin Primacy 3 виявляє більш рівномірну й лінійну реакцію на зміну тиску, демонструючи деформації як у поперечному, так і у поздовжньому напрямках. Така поведінка є наслідком підвищеної жорсткості гумової суміші, оптимізованої для високотемпературних умов експлуатації, а також більш жорсткого каркаса, який меншою мірою компенсує зниження внутрішнього тиску. У результаті відбувається зміна конфігурації контактної плями — від округлішої до більш витягнутої, що обумовлює специфіку розподілу навантаження по протектору, рівень зчеплення під час руху на сухому та мокрому асфальті, а також впливає на курсову стійкість та поведінку автомобіля при маневруванні на високих швидкостях.

Отримані експериментальні дані дозволяють стверджувати, що сезонні типи шин відрізняються не лише рисунком протектора чи твердістю гумової суміші, а й характером їхньої механічної взаємодії з опорною поверхнею під навантаженням. Ці відмінності визначають ефективність шин у відповідних кліматичних та дорожніх умовах, а також підтверджують необхідність обґрунтованого вибору шин із урахуванням сезонності, режимів експлуатації, типу дорожнього покриття та вимог до прохідності й безпеки руху.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Samuel K. Clark. Mechanics of Pneumatic Tires, Nat. Bur. Stand : monogr. 1971. 853 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph122.pdf> (Last accessed 05.13.2026)
2. Smith D.L.O., Dickson J.W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction, *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1990. Vol. 46. Pp. 13-29. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(05\)80110-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(05)80110-6)
3. A Study on the Contact Characteristics of Tires–Roads Based on Pressure-Sensitive Film Technology / Chen B., Ding P., Wei G., Xiong C., Wang F., Yu J., Yu H., Zou Y. *Materials*. 2023. no 16. 6323. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16186323>

4. Arriaga F., Luck B., Siemering G. Managing Soil Compaction at Planting and Harvest (A4158). Madison, 2018. URL: <https://learningstore.extension.wisc.edu/products/managing-soil-compaction-at-planting-and-harvest-p1883> (Last accessed 22.01.2026)
5. Douglas R., Woodward D., Woodside A. Road contact stresses and forces under tires with low inflation pressure. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/237188591_Road_contact_stresses_and_forces_under_tires_with_low_inflation_pressure (Last accessed 22.01.2026)
6. Duiker, S. Avoiding Soil Compaction. Penn State Extension. 2004. URL: <https://extension.psu.edu/avoiding-soilcompaction> (Last accessed 22.01.2026)
7. Vermeulen G. D., Perdok U. D. Chapter 19 - Benefits of Low Ground Pressure Tyre Equipment, *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier. 1994. Vol. 11. Pp. 447-478. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50027-1>
8. Prediction of aspects of soil-wheel systems / A. J. Koolen, P. Lerink, D.A.G. Kurstjens, J.J.H. van den Akker, W.B.M. Arts. *Soil and Tillage Research*. 1992. Vol. 24. Iss. 4. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90120-Z](https://doi.org/10.1016/0167-1987(92)90120-Z)
9. Measurement of Contact Patch Pressure Behaviors in High-Speed Dynamic Conditions / Marco Furlan, Matthew Strang, Mateo Gladstone, Henning Olsson. *Tire Science and Technology*. 2025. no 53 (1). Pp. 2–13. doi: <https://doi.org/10.2346/789802>
10. Effect of Increased Deflection Tire Technology on Soil Compaction / Mehari Z. Tekeste, Thomas R. Way, Wayne Birkenholz, Sally Brodbeck. *Journal of the ASABE*. 2023. No 66(1). Pp. 75-84. URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=53760> (Last accessed 22.01.2026)
11. Costanzi M., Rouillard V., Cebon D. Effects of tire contact pressure distribution on the deformation rates of pavements. *9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. International Forum for Road Transport Technology*. 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/237260941_Effects_of_tire_contact_pressure_distribution_on_the_deformation_rates_of_pavements (Last accessed 22.01.2026)
12. Effects of tire inflation pressure on soil contact pressure and rolling resistance of farm tractors / Van N.V., Matsuo T., Kuomoto T., Inaba Shigeki. *Bull Fac Agr Saga Univ*. 2008. URL: https://www.researchgate.net/publication/292697477_Effects_of_tire_inflation_pressure_on_soil_contact_pressure_and_rolling_resistance_of_farm_tractors (Last accessed 22.01.2026)
13. Effect of Tire Inflation Pressure on Rolling Resistance, Contact Patch Area and Braking Distance / Ishan P. Mehta, Sudhendunath N. Pande, Mayank B. Patel, Gurpritsingh T. Virdi. *International Journal of Science Technology & Engineering*. 2017. Vol. 3. Issue 10. URL: https://www.academia.edu/35691809/Effect_of_Tire_Inflation_Pressure_on_Rolling_Resistance_Contact_Patch_Area_and_Braking_Distance (Last accessed 22.01.2026)
14. What happens in the tire contact area? / Marzieh Salehi, Jacques W. M. Noordermeer (Contributor), Louis A.E.M. Reuvekamp, Anke Blume. *Tire Technology Expo 2020 – Hanover Messe*. Hanover, 2020.
15. Писарцов О. Залежність впливу тиску на опорну поверхню від тиску в літній шині розміром 225/55 R18. *Автомобільний транспорт*. 2025. No (56). Pp. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.56.0.02>
16. Писарцов О. С. Залежність впливу тиску на опорну поверхню від тиску в зимовій шині Triangle snowlink PI01 Типорозміру 225/55 R18. *Машинобудування*. 2025. Iss. 35. Pp. 54-64 DOI: <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-06>
17. Писарцов О. С. Дослідження тиску на опорну поверхню транспортного засобу категорії М₁ на прикладі «Опель Grandland 1,5 BHDI». Сучасне автомобілебудування, автотехнічна експертиза, експлуатація автомобільного транспорту та підготовка фахівців галузі транспорт : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. до Дня автомобіліста та дорожника Харків : ХНАДУ, 2024.

Отримано: 17.12.2025 / Переглянуто: 23.01.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹PYSARTSOV O, PhD

Associate professor Department of Automobiles named after A. B. Gredeksul,

e-mail: alex.pisartsov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4661-5441>

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University*

Yaroslava Mudrogo str. 25,61002, Kharkiv, Ukraine

COMPARATIVE STUDY OF THE SUPPORT INTERACTION CHARACTERISTICS OF SUMMER AND WINTER PNEUMATIC TIRES OF SIZE 225/55 R18 DEPENDING ON INTERNAL PRESSURE

Optimization of the interaction between a pneumatic tire and the supporting surface is one of the key conditions for ensuring the efficiency, stability, and safety of vehicle operation. Under modern operating conditions, where vehicles are frequently used on both paved roads and weak or unstable surfaces, the need for a scientifically grounded approach to regulating internal tire pressure is increasing.

Within this study, a comparison was carried out between the relationship of internal pressure in summer Michelin Primacy 3 tires and winter Triangle Snowlink PL01 tires of size 225/55 R18, and the magnitude of the contact pressure transmitted by the vehicle to the supporting surface. Optimization of tire pressure is a fundamental factor in improving off-road capability, reducing the load on the road surface, and enhancing vehicle handling—especially when driving on soft, uneven, or low-bearing-capacity surfaces such as sand, snow, or marshy ground.

The study also analyzed possible methods of influencing contact pressure and proposed practical measures aimed at increasing vehicle mobility performance. The main objective of the research was to determine the regularities in the change of pressure on the contact surface in summer and winter tires depending on their internal pressure.

Experimental testing was conducted according to the developed methodology using an M1-category vehicle with enhanced off-road capabilities—an Opel Grandland 1.5 BHDi. Tests were carried out on a flat concrete surface using summer Michelin Primacy 3 tires and winter Triangle Snowlink PL01 tires of size 225/55 R18.

The obtained experimental data indicate that seasonal tire types differ not only in tread pattern or rubber compound hardness but also in the nature of their mechanical interaction with the supporting surface under load. These differences determine tire effectiveness in specific climatic and road conditions and confirm the necessity of justified tire selection based on seasonality, operating modes, road surface type, and requirements for mobility and driving safety.

The graphical dependencies presented in the article for tires designed for different climatic conditions clearly confirm the effectiveness and engineering feasibility of reducing internal tire pressure during vehicle operation in challenging road and off-road environments. The demonstrated results show that winter and summer pneumatic tires exhibit fundamentally different deformation behavior and interaction patterns with the supporting surface, even under identical external conditions and within the same range of internal pressure variation. The identified differences are determined by a combination of structural, material, and operational factors that define the mechanical response of tires of different seasonal types under load.

KEYWORDS: ground pressure, tire pressure, contact patch area, off-road capability, tires.

In cites: Pysartsov O. (2026). Comparative study of the support interaction characteristics of summer and winter pneumatic tires of size 225/55 r18 depending on internal pressure. *Engineering*, (37), 126-136. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-11> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Samuel K. Clark 1971, *Mechanics of Pneumatic Tires* <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph122.pdf>
2. Smith, D.L.O. & Dickson, J.W. 1990, 'Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction', *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 46, Pp. 13-29, [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(05\)80110-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(05)80110-6)
3. Chen, B, Ding, P, Wei, G, Xiong, C, Wang, F, Yu, J, Yu, H & Zou, Y 2023, 'A Study on the Contact Characteristics of Tires–Roads Based on Pressure-Sensitive Film Technology', *Materials*, no 16, 6323. <https://doi.org/10.3390/ma16186323>
4. Arriaga, F, Luck B & Siemering. G 2018, *Managing Soil Compaction at Planting and Harvest* Madison, viewed <<https://learningstore.extension.wisc.edu/products/managing-soil-compaction-at-planting-and-harvest-pl1883>>
5. Douglas, R, Woodward, D & Woodside OBE, A 2011, 'Road contact stresses and forces under tires with low inflation pressure', *Canadian Journal of Civil Engineering*, viewed <https://www.researchgate.net/publication/237188591_Road_contact_stresses_and_forces_under_tires_with_low_inflation_pressure>
6. Duiker, S 2004, *Avoiding Soil Compaction*. Penn State Extension, viewed <<https://extension.psu.edu/avoiding-soilcompaction>>
7. Vermeulen, GD & Perdok, UD 1994, 'Chapter 19 - Benefits of Low Ground Pressure Tyre Equipment', *Developments in Agricultural Engineering*, Elsevier, Vol. 11, Pp. 447-478 <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50027-1>
8. Koolen, AJ, Lerink, P, Kurstjens, DAG, van den Akker, JJH & Arts, WBM 1992, 'Prediction of aspects of soil-wheel systems', *Soil and Tillage Research*, Vol. 24, Issue 4. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(92\)90120-Z](https://doi.org/10.1016/0167-1987(92)90120-Z)
9. Marco Furlan, Matthew Strang, Mateo Gladstone & Henning Olsson 2025, 'Measurement of Contact Patch Pressure Behaviors in High-Speed Dynamic Conditions', *Tire Science and Technology*, iss 53 (1), Pp. 2–13. doi: <https://doi.org/10.2346/789802>
10. Mehari, Z. Tekeste, Thomas R. Way, Wayne Birkenholz & Sally Brodbeck 2023, 'Effect of Increased Deflection Tire Technology on Soil Compaction', *Journal of the ASABE*, no 66(1), Pp. 75-84. viewed <<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=53760>>
11. Marco Costanzi, Vincent Rouillard & Cebon David 2019, 'Effects of tire contact pressure distribution on the deformation rates of pavements', *9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions. International Forum for Road Transport Technology, February 2019*, viewed <https://www.researchgate.net/publication/237260941_Effects_of_tire_contact_pressure_distribution_on_the_deformation_rates_of_pavements>
12. Van, NV, Matsuo, T, Kuomoto, T & Inaba, Shigeki 2008, 'Effects of tire inflation pressure on soil contact pressure and rolling resistance of farm tractors', *Bull Fac Agr Saga Univ*, viewed <https://www.researchgate.net/publication/292697477_Effects_of_tire_inflation_pressure_on_soil_contact_pressure_and_rolling_resistance_of_farm_tractors>
13. Ishan P. Mehta, Sudhendunath N. Pande, Mayank B. Patel, Gurpritsingh T. Virdi 2017, 'Effect of Tire Inflation Pressure on Rolling Resistance, Contact Patch Area and Braking Distance', *International Journal of Science Technology & Engineering*, Vol. 3, Issue 10, viewed <https://www.academia.edu/35691809/Effect_of_Tire_Inflation_Pressure_on_Rolling_Resistance_Contact_Patch_Area_and_Braking_Distance>
14. Marzieh Salehi, Jacques W.M. Noordermeer (Contributor), Louis A.E.M. Reuvekamp & Anke Blume 2020, 'What happens in the tire contact area?', *Tire Technology Expo 2020 – Hanover*
15. Pysartsov, O 2025, 'Zalezhnist vplyvu tysku na opornu poverkhniu vid tysku v litnii shyni rozmirom 225/55 R18' [Dependence of the effect of pressure on the supporting surface on the pressure in a summer tire of size 225/55 R18], *Avtomobilnyi transport*, iss (56), Pp. 13–18. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2025.56.0.02> (in Ukraine)
16. Pysartsov, OS 2025, 'Zalezhnist vplyvu tysku na opornu poverkhniu vid tysku v zymovii shyni Triangle snowlink PI01 Typorozmiru 225/55 R18' [Dependence of the pressure effect on the

bearing surface on the pressure in the winter tire Triangle snowlink PI01 Typorozmiru 225/55 R18], *Mashynobuduvannia*, no 35, Pp. 54-64 <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-35-06> (in Ukraine)

17. Pysartsov, OS 2024, 'Doslidzhennia tysku na opornu poverkhniu transportnoho zasobu katehorii M1 na prykladi «Opel Grandland 1,5 BHDI»' [Research on the pressure on the supporting surface of a vehicle of category M1 using the example of "Opel Grandland 1.5 BHDI"], *Cuchasne avtomobilebuduvannia, avtotekhnichna ekspertyza, ekspluatatsiia avtomobilnoho transportu ta pidhotovka fakhivtsiv haluzi transport, KhNADU*, 22-23 zhovtnia 2024 r. (in Ukraine)

Submission received: 12.17.2025/Revised: 01.23.2025/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-12>

УДК 521. 597

¹**ВОЛЬЧЕНКО О. І.**, доктор технічних наук, професор кафедри
будівельних та дорожніх машин

e-mail: vol21@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0388-8351>

²**ВОЗНИЙ А. В.**, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних
телекомунікаційних технологій і систем

e-mail: andrii.voznyi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>

³**ВУДВУД О. М.**, кандидат технічних наук, завідувач кафедри
підйомно-транспортного та робототехнічного обладнання

e-mail: alex.vudvud@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4807-3634>

¹**СЕМЕНІЙ О. М.**, аспірант кафедри будівельних та дорожніх машин

e-mail: alexander.psy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2464-6508>

²**АНДРЕЙЧИКОВ Є. Ю.**, підполковник, старший викладач

кафедри військової підготовки

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4579-3636>

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет

вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019

³ Одеський національний політехнічний університет

пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044

ПРОЕКТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОГО КАМЕРНОГО ДИСКОВО-КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА

У матеріалах статті розглянуто оптимізаційне проектування пар тертя дисково-колодкового гальма камерного типу з урахуванням обмежень на конструктивні та експлуатаційні параметри. Представлено конструкцію і роботу камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки, з гальмовим диском, який складається з двох напівдисків змінної товщини, більша з яких відповідає максимальному радіусу поясу тертя, а найменша – його мінімальному радіусу. В якості теплоносія в камері диска в системі охолодження використано легкоплавкий Li у вигляді порошку змішаного з водою. За допомогою методу сил визначено сили інерції, радіальну і тангенціальну силу, що діють на камерний диск та нанорідину в об'ємі камери. Виконано моделювання напружено-деформованого стану диска для дослідження механічних і теплових напружень за допомогою програми Ansys Workbench. Визначено і проаналізовано значення максимальних еквівалентних напружень та градієнтів напружень по товщині камерного диска. За допомогою теплового балансу камерного диска оцінено ефективність нанорідинного охолодження. Здійснено оцінку теплового балансу при вимушеному повітряному та примусовому нанорідинному охолодженні металевих фрикційних елементів. Дослідно-конструкторські розробки, теоретичні дослідження та натурно-обчислювальний експеримент щодо нового типу камерного дисково-колодкового гальма з нанорідинним охолодженням дозволили встановити закономірності зміни експлуатаційних параметрів у вигляді графічних залежностей. Зроблено порівняння основних експлуатаційних та теплообмінних параметрів серійного та розробленого дисково-колодкового гальма бурової лебідки. Досягнуто покращення зносо-фрикційних властивостей пар тертя за рахунок експлуатації гальма в інтервалі температур, нижчих за допустиму для матеріалу фрикційних накладок, і, як наслідок, гальмових якостей для підйомного вала бурової установки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: бурова лебідка, дисково-колодкове гальмо, фрикційний вузол, гальмовий диск, камера гальмового диску, нанорідинна, напружено-деформований стан

Як цитувати: Вольченко О. І., Возний А. В., Вудвуд О. М., Семеній О. М., Андрейчиков Є. Ю. Проектування ефективного камерного дисково-колодкового гальма. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 137-152. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-12>



Вступ

Для забезпечення нормальної експлуатації підйомно-транспортної техніки забезпечуються надійно діючими парами тертя гальмових пристроїв, які повинні зупиняти її та вантаж на певному шляху гальмування та утримувати його у підвішеному стані при заданому запасі коефіцієнта гальмування та величині уповільнення.

Значення ефективності гальмових пристроїв зростає у зв'язку з інтенси-

фікацією виробництва, збільшенням рухомих мас, швидкостей руху та частоти гальмування. У сучасній підйомно-транспортній техніці пари тертя гальма протягом короткого періоду часу повинні перетворити на теплову енергію значну кількість механічної енергії та розсіяти її у навколишнє середовище без зниження їхньої працездатності в механізмах, агрегатах та вузлах.

Аналіз літературних джерел

В роботі [1] проведено порівняння закордонних моделей дисково-колодкових гальм з гідравлічним приводом PS440-9000 і PS40-900 бурових установок ZJ12 і ZJ15 і було встановлено, що для збільшення гальмового моменту в 11 разів діаметр гальмового диска збільшується в 1,7 рази, а кількість гальмових вузлів – з 2 до 7 при різкому гальмуванні з 1 до 3, а тиск у гідравлічній системі збільшується з 7,0 до 8,0 МПа. Однак не було розглянуто різке збільшення енергонавантаженості пар тертя вище за допустиму температуру для матеріалів фрикційних накладок, що викликало деградацію їх поверхневих шарів, що, у свою чергу, викликало зниження ефективності гальмування.

У парах тертя дисково-колодкового гальма діють великі імпульсні питомі навантаження до 8,0 МПа при експлуатації восьми пар елементів тертя при спуску свічок на великі глибини буріння. При цьому пояс тертя диска перекривається накладками, а його матова площа взаємодіє з повітрям, що омиває її.

У роботі [2] зазначено, що прагнення до досягнення мінімального зношування деталей у вузлах тертя призвело до формування чотирьох основних напрямів пошуку технічних рішень у триботехніці, заснованих на ефектах беззносності, створення нових конструкцій вузлів тертя з новими фрикційними матеріалами; технологій обробки поверхонь деталей вузлів тертя, нових методів та засобів зниження теплонавантаженості фрикційних вузлів.

Нові конструкції гальмових механізмів потужних транспортних засобів та особливості їх розрахунку проілюстровані у роботі [3]. Запропоновано нову констру-

кцію комбінованого гальма, яка поєднує переваги багатодискового гальма по енергоємності та однодискового – по швидкодії. Встановлено, що функціональна працездатність комбінованих гальм значною мірою залежить від характеру розподілу теплової енергії за його складовими механізмами, що, у свою чергу, обумовлює зміну зносу – фрикційних властивостей пар тертя при гальмуванні. Експериментальним шляхом для складових комбінованого гальма отримано величини зміни моменту тертя, швидкості ковзання, температури поверхні тертя в залежності від часу гальмування. Запропонована методика використовується під час проектування аналогічних гальмових пристроїв.

На теплову навантаженість фрикційних вузлів гальмових пристроїв впливають такі фактори: конструктивні особливості та геометричні параметри; матеріали пар тертя та їх механічні та теплофізичні характеристики; пружно-пластичні деформації поверхневих шарів пар тертя; зміни, що відбуваються в робочому шарі матеріалів під час гальмування, а також залишкові явища; інтенсивність вимушеного охолодження, методи та засоби примусового охолодження фрикційних вузлів.

Теплота, що генерується на поверхні тертя фрикційного вузла, розподіляється між деталями, що труться, відповідно до коефіцієнта розподілу теплових потоків, що визначається співвідношенням теплофізичних характеристик матеріалів тертьових деталей і їх геометричних розмірів. При цьому в неметалевий фрикційний матеріал йде менша (до 10 відсотків) частина теплоти, що генерується на фрикційному контакті. Тим не менш, поверхнево-об'ємні

температури та їх градієнти досить великі, щоб обумовлювати проходження основних фізико-хімічних процесів, характерних для типових фрикційних матеріалів: розм'якшення, плавлення, випаровування, деструкцію і згоряння сполучного, утворення поверхневих, зносу та його видалення.

У роботі [4] сформульовано новий клас завдань теплової динаміки, а також проілюстровано термограми та схеми циркуляції теплових струмів у дисках, на які поділено гальмовий шків, які були виготовлені з матеріалів з різними коефіцієнтами теплопровідності, а між ними встановлені теплоізоляційні прокладки.

Конструкція і робота камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки

Розглянемо особливості конструкції і роботу серійного дисково-колодкового гальма, охолоджуваного вимушено потоками повітря. На рис 1 а, б наведено загальний вигляд серійної бурової лебідки з дисково-колодковими гальмами, що охолоджуються повітряними потоками навколишнього середовища (а) і дисково-колодкових гальм з гідравлічним приводом (б).

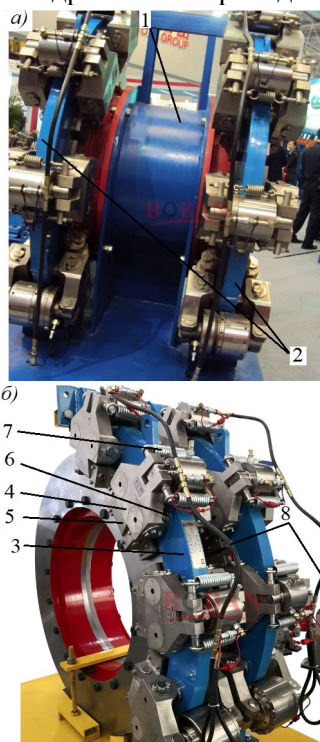


Рис. 1 – Конструкції: а – бурової лебідки з серійними дисково-колодковими гальмами, охолоджуваними повітрям; б – гальма з гідравлічним приводом.

Fig. 1 – Designs: а – drilling winch with serial disc-pad brakes, cooled by air; б – brakes with hydraulic drive.

Удосконалено метод визначення конструктивних параметрів дисків гальма за допомогою геометричного програмування з використанням цільової функції мінімізації моменту інерції диска та термічних напружень на його бічних поверхнях, виходячи з умови забезпечення гальмового моменту, що регламентується, і неперевикнення допустимої поверхневої температури для матеріалів фрикційних накладок. При цьому розроблено алгоритм та програму розрахунку. Результати розрахунків показали, що металомісткість спроектованого гальмового диска на 10 – 13% менша від серійного [5, 6].

До складу бурової лебідки входить барабан 1 і пара дисково-колодкових гальм, що мають гальмові диски 2 з поясами тертя 3. Гальмова система має гідравлічний привід.

Дисково-колодкове гальмо з вимушеним повітряним охолодженням працює при спуско-підйомних операціях колони бурильних труб залежно від її ваги в аперіодичному циклічному і тривалому режимах гальмування. Дисково-колодкові гальма встановлюються з обох боків барабана 1 бурової лебідки. Вони мають суцільні металеві диски 2, на поясах тертя 3 яких знаходяться супорти 4, що мають кліщеві тримачі 6 двосторонньої дії для фрикційних накладок 5 на металевих підкладках. Пружинні пристрої 7 вмикання та вимикання супортів 4 розміщені зверху. Супорти 4 мають індивідуальні гідравлічні приводи 8.

При гальмуваннях в парах тертя гальм генерується значна кількість теплоти, яка не в змозі повністю відвестися в навколишнє середовище від гальмових дисків. Для інтенсифікації відведення теплоти запропоновано систему примусового повітряно-нанорідинного охолодження пар тертя дисково-колодкового гальма бурової лебідки.

На рис. 2 схематично наведено фрагменти дисково-колодкового гальма з камерою примусової повітряно-нанорідинної системи охолодження.

Дисково-колодкове гальмо бурової лебідки з введеними конструктивними особливостями працює так. Гальмовий

диск 1 складається з двох напівдисків 2 і 3 змінної товщини, більша з яких відповідає максимальному радіусу поясу тертя 4, а найменша – його мінімальному радіусу. Своєю внутрішньою формою напівдиски 2 і 3 з товщиною, що змінюється за лінійним

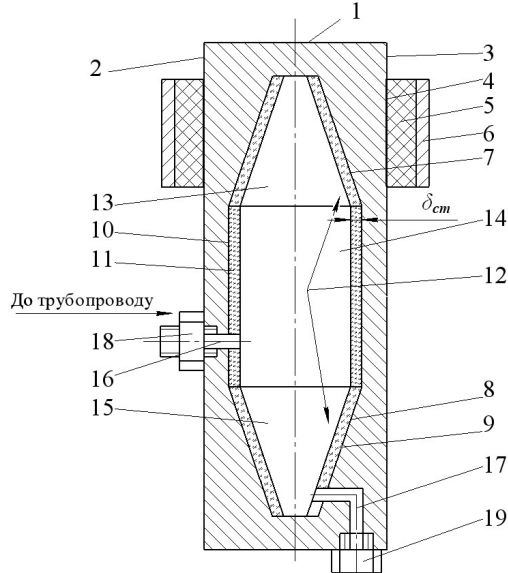


Рис. 2 – Схематичне зображення камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки з системою примусового повітряно-нанорідинного охолодження

Fig. 2 – Schematic representation of a chamber disc-pad brake of a drilling winch with a forced air-nanofluid cooling system

законом, утворюють дифузори [7, 8] 7 і 8 у верхній і нижній частині диска 1. При такому конструктивному виконанні дифузори 7 і 8 є прискорювачами відведення теплоти від зон випаровування 13 у суміщену зону транспорту 14 і конденсації 15 незалежно від агрегатного стану нанорідини. Це відбувається за рахунок: по-перше, незначної зміни градієнта об'ємної температури на поясі тертя 4 напівдиска 3 і зменшення гальмового моменту по діаметру диска 1; по-друге, суттєвої відмінності площ теплообміну зон випаровування 13, транспорту 14 і конденсації 15; по-третє, різних розмірів частинок капілярної

структури у зонах взаємодії з нанорідиною. При повороті диска на 180° кожен дифузор стає конфузором [9].

При надзвичайно активному генеруванні теплоти на поверхні тертя диска 1 рідина в його камері майже миттєво перетворюється на пару, що спричинює вибух. В якості теплоносія в камері 12 диска 1 в системі охолодження використано легкоплавкі метали (Na , $t_n = 97,79^\circ\text{C}$ і Li , $t_n = 180,5^\circ\text{C}$) у вигляді порошків, змішаних з водою. Ми застосували порошок літію Li (50% літійового порошку і 50% води). Він здатний відводити значні теплові потоки (порядку $15,0 \text{ кВт/см}^2$ при поверхнево-об'ємній температурі пар тертя 800°C) [10, 11, 12]. Заправлення системи охолодження проводиться крізь отвір каналу 16, який закривається впускним клапаном 18 (див. рис. 2) на $\frac{3}{4}$ об'єму камери 12 диска 1.

Рушійною силою в процесах нагрівання і охолодження поясів тертя диска гальма виступають градієнти температур шарів нанорідини, які потрапляють у зони випаровування 13, конденсації 15 і транспорту 14 [13, 14, 15]. При обертанні диска 1 відцентрова сила відкидає нанорідину на внутрішні стінки камери 12. Уповільнювачем перебування за часом нанорідини в зоні випаровування 13 є модифікована капілярна структура 11.

Принцип примусового повітряно-нанорідинного охолодження пар тертя камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки полягає в тому, що поверхні дифузоров 7 і 8 покриті дрібними частинками капілярної структури 11, вони є зонами випаровування 13 [9]. Зони транспорту 14 і конденсації 15 устелені капілярною структурою 10 з великими частинками. Зовнішнє примусове вимушене охолодження матових і полірованих поверхонь диска 1, що обертається, забезпечує конвективний і радіаційний теплообмін омиваючими потоками навколишнього середовища.

Сили, що діють на гальмовий диск з нанорідинною камерою

На гальмовий диск діють сили: інерції, радіальна і тангенціальна (рис. 3). Розглянемо кожну з них окремо.

Обчислимо відцентрову силу інерції, що виникає в гальмовому диску з

внутрішньою камерою при вільному обертанні та гальмуванні. Розрахунок враховує зміну товщини стінок диска в залежності від радіуса та вплив геометрії камери на розподіл зведеної маси.

Початкові дані: зовнішній радіус диска: $R = 0,6$ м; товщина диска: $\delta = 0,12$ м; зовнішній радіус камери: $R_{кам} = 0,57$ м; густина сталевго диска: $\rho = 7350$ кг/м³; мінімальна товщина стінки: $\delta_1 = 0,025$ м на радіусі $r_1 \leq 0,35$ м камери; максимальна товщина стінки: $\delta_2 = 0,05166$ м на радіусі $R_{кам} = 0,57$ м камери; кутова швидкість: $\omega = 10,47$ рад/с (відповідає 100 об/хв).

Товщина стінки камери диска визначається як функція радіуса $t(r)$:

$$t(r) = \begin{cases} 0,025, & 0 \leq r \leq 0,35; \\ 0,025 + \left(\frac{0,05166 - 0,025}{0,57 - 0,35} (r - 0,35) \right), & 0,35 \leq r \leq 0,57; \\ 0,35 \text{ м} \leq r \leq 0,57 \text{ м}. \end{cases} \quad (1)$$

Товщина стінки камери на кожному досліджуваному радіусі [16,17]:

$$h(r) = \begin{cases} \delta - t(r), & 0 \leq r \leq R_{кам}; \\ \delta, & R_{кам} < r \leq R. \end{cases} \quad (2)$$

Розглянемо диференціальну силу інерції. Для елемента кільцевої форми на радіусі r (див. рис. 3):

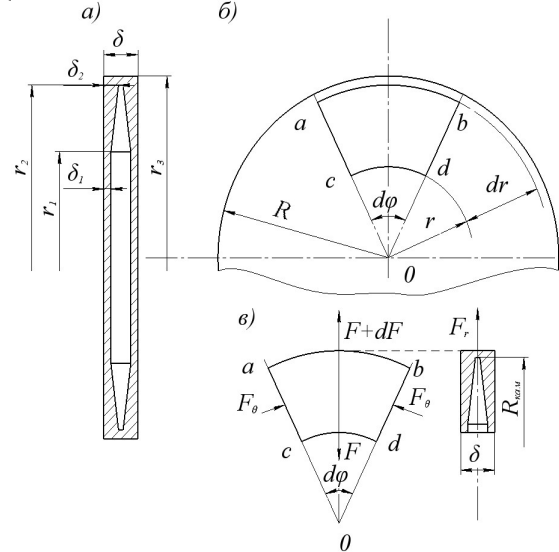


Рис. 3 – Поздовжній розріз гальмового диска (а) та його фронтальний вигляд (б); виділений елемент з поясу тертя диска (в)

Fig. 3 – Longitudinal section of the brake disc (a) and its front view (b); a selected element from the friction zone of the disc (c)

$$dF = \omega^2 \cdot r \cdot dm = \omega^2 \cdot r \cdot \rho \cdot 2\pi \cdot h(r) \cdot dr = 2\pi\rho\omega^2 r^2 h(r) dr \quad (3)$$

Сумарну величину сили інерції диска визначаємо інтегруванням по всій висоті диска:

$$F = \int_0^R 2\pi\rho\omega^2 r^2 h(r) dr \quad (4)$$

Через змінну товщину стінки камери диска розбиваємо інтеграл на три складові:

$$F = 2\pi\rho\omega^2 \left[\int_0^{0,35} r^2 (\delta - 0,025) dr + \int_{0,35}^{0,57} r^2 \left(\delta - \left(\frac{0,025 + 0,02666}{0,22} \times (r - 0,35) \right) \right) dr + \int_{0,57}^{0,6} r^2 \delta dr \right] \quad (5)$$

Обчислення інтеграла здійснено частинами:

1. Для $0 \leq r \leq 0,35$ м:

$$\int_0^{0,35} r^2 (0,12 - 0,025) dr = 0,095 \frac{0,35^2}{3} = 0,00136.$$

2. Для $0,35 \text{ м} < r \leq 0,57$ м:

$$t(r) = 0,025 + 0,12118(r - 0,35);$$

$$h(r) = 0,12 - t(r) = 0,095 - 0,12118(r - 0,35);$$

$$\int_{0,35}^{0,57} r^2 (0,095 - 0,12118(r - 0,35)) dr = 0,00423.$$

3. Для $0,57 \text{ м} < r \leq 0,6$ м:

$$\int_{0,57}^{0,6} r^2 \cdot 0,12 dr = 0,12 \cdot \frac{0,6^3 - 0,57^3}{3} = 0,00042.$$

Підставивши всі складові, отримуємо:

$$F = 2\pi \cdot 7350 \cdot 10,47^2 (0,00136 + 0,00423 + 0,00042) = 48,704 \text{ кН}.$$

Крім сумарної відцентрової сили, що діє на всю масу диска, важливо враховувати розподіл радіальних сил по його об'єму. Елементарна радіальна сила дорівнює:

$$dF_r = 2\pi r h(r) \rho \omega^2 r dr = 2\pi \rho \omega^2 r^2 h(r) dr \quad (6)$$

Чисельно сумарна радіальна сила дорівнює:

$$F_r = 2\pi \rho \omega^2 \int_0^R r^2 h(r) dr = F = 48704 \text{ Н}.$$

Відцентрова сила напрямлена радіально і дорівнює інтегралу маси диска, помноженої на $\omega^2 \cdot r$.

Сумарна радіальна сила, що діє на кільцеву ділянку радіуса r , визначає місцеве питоме навантаження на диск і може використовуватися для розрахунку механічних напружень:

$$\sigma_r(r) = \frac{F_r(r)}{A(r)}, \quad (7)$$

де $\sigma_r(r)$ – механічні напруження в радіальному напрямку, $A(r)$ – площа поперечного перерізу кільцевого елемента диска:

$$A(r) = 2\pi r h(r). \quad (8)$$

Тангенціальні сили виникають внаслідок дії відцентрових зусиль, що розтягують стінку диска у тангенціальному напрямку при його обертанні. Елементарна тангенціальна сила дорівнює:

$$dF_\theta = \rho \omega^2 r dV = \rho \omega^2 r h(r) 2\pi r dr = 2\pi \rho \omega^2 r^2 h(r) dr \quad (9)$$

Цей вираз є ідентичним до диференціальної сили інерції диска, оскільки в циліндричних координатах вона містить тангенціальну складову. При розрахунку напружень у напрямку кільцевого поясу враховують середній радіус диска:

$$\sigma_\theta(r) = \frac{F_\theta(r)}{A(r)} = \frac{2\pi \rho \omega^2 r^2 h(r)}{2\pi r h(r)} = \rho \omega^2 r. \quad (10)$$

Тангенціальні напруження зростають лінійно з радіусом диска:

$$\sigma_\theta(r) \propto r.$$

За величиною цих напружень перевіряють міцність стінок камери диска при вільному обертанні та гальмуванні, особливо в зоні його максимального радіуса $R_{кам}$.

Обчислимо тангенціальну силу dF_θ для елемента диска товщиною $dr = 0,01$ м на зовнішньому радіусі $r = 0,6$ м. Підставляємо значення: $\rho = 7350$ кг/м³; $\omega = 10,47$ рад/с; $r = 0,6$ м; $h(r) = \delta = 0,12$ м; $dr = 0,01$ м в залежність (9):

$$dF_\theta = 2\pi \cdot 7350 \cdot 10,47^2 \cdot 0,6^2 \cdot 0,12 \cdot 0,01 = 2190 \text{ Н.}$$

Отже, на тонкий кільцевий елемент диска на зовнішньому радіусі діє тангенціальна сила у 2190 Н.

Отримані формули дозволяють враховувати реальний розподіл маси і напружень в тілі гальмового диска при обертанні та гальмуванні. Такий підхід потрібний для точного аналізу навантажень, особливо при високошвидкісному обертанні диска. Розрахунок є базовим для подальшої оцінки напруженого стану при проектуванні диска із зменшеними інерційними навантаженнями.

Сили, що діють на нанорідину у камері гальмового диска

Розглянемо відцентрову і тангенціальну сили і проаналізуємо їхню взаємодію зі стінками камери диска (рис. 4 а, б).

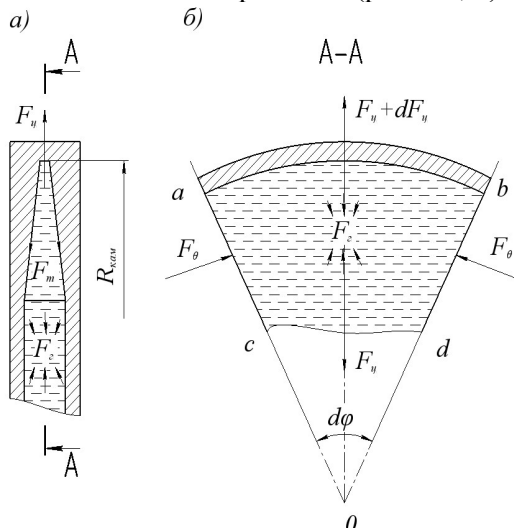


Рис. 4 – Поздовжній переріз гальмового диска з камерою, наповненою нанорідиною (а) і переріз А-А внутрішньої камери диска (б)

Fig. 4 – Longitudinal section of a brake disc with a chamber filled with nanofluid (a) and section A-A of the inner chamber of the disc (b)

Відцентрова сила елемента нанорідини на радіусі r розраховується за формулою:

$$dF_u = 2\pi \cdot \rho_n \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot h(r) dr. \quad (11)$$

Інтегруючи по радіусу диска від $r = 0$ до $r = R_{кам} = 0,57$ м, отримуємо:

$$dF_u = \int_0^{R_{кам}} 2\pi \cdot \rho_n \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot h_{max} dr; \quad (12)$$

$$F_u \approx \pi 1624,08 \approx 5091,89 \text{ Н.}$$

Гідростатичний тиск на нанорідину у камері дорівнює:

$$P = \rho_n \cdot g \cdot h_n, \quad (13)$$

де h_n – висота нанорідини в камері.

Сила, що створюється гідростатичним тиском на нанорідину, яка знаходиться в камері диска, визначається інтегруванням по її висоті:

$$F_z = \int_0^{h_{max}} \rho_n \cdot g \cdot h_n \cdot A dh_n, \quad (14)$$

де $A = 2\pi r h_n$ – площа поперечного перерізу нанорідини на висоті h_n .

Сили гідростатичного тиску на нанорідину у камері диска:

$$F_z \approx \pi 45,90 \approx 144,58 \text{ Н.}$$

Тангенціальні сили виникають через відцентрові зусилля, що розширюють рідину в камері. Для елемента маси нанорідини тангенціальна сила розраховується за формулою:

$$dF_\theta = \rho_n \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot h(r) \cdot dr. \quad (15)$$

Інтегруючи по радіусу від $r = 0$ до $r = R_{\text{кам}}$, отримуємо:

$$F_\theta = \int_0^{R_{\text{кам}}} \rho_n \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot h(r) \cdot dr; \quad (16)$$

$$F_\theta \approx 812,04 \text{ Н.}$$

При взаємодії нанорідини зі стінками камери розраховуємо сили гідростатичного тиску і тертя, що виникають між нанорідиною та стінками. Якщо стінки мають

динамічний коефіцієнт тертя f , то сила тертя між стінками камери та рідиною розраховується за виразом:

$$F_m = f \cdot p \cdot A_{\text{см}}, \quad (17)$$

де $f = 0,2$ – динамічний коефіцієнт тертя матеріалу диска; $A_{\text{см}} = 2\pi rh$ – площа стінки камери, на яку діє сила тертя.

Результат розрахунку для сили тертя:

$$F_m \approx \pi 9,18 \approx 28,85 \text{ Н}$$

З отриманих результатів обчислень випливає, що основними силами, які діють на нанорідину в камері, є відцентрова і тангенціальна. Гідростатичний тиск та силу тертя між нанорідиною і стінками камери можна не враховувати через їх малість. Сили F_o і F_u є важливими для розрахунку механічного стану системи примусового охолодження при проектуванні камерних гальмових дисків.

Скінченно-елементне моделювання напружено-деформованого стану камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки

Для дослідження механічних і теплових напружень використано метод скінченно-елементного моделювання за допомогою програми Ansys Workbench.

Розглядали фрикційний вузол «диск-накладки» з такими початковими конструктивними та експлуатаційними параметрами: матеріал гальмового диска – СЧ 25, питоме навантаження на пояс тертя диска $p=7,0$ МПа, матеріал фрикційної накладки ФК-24А, допустима об'ємна температура мате-

ріалу накладки 390°C , температура навколишнього середовища $t_0=22^\circ\text{C}$. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від зовнішньої поверхні в омиваюче середовище $\alpha_n=27,0$ Вт/(м²·°C), коефіцієнти тепловіддачі від внутрішньої поверхні диска і поверхні дифузора в омиваючу нанорідину, відповідно, $\alpha_{\text{вн}}=60,0$ Вт/(м²·°C) і $\alpha_d=90,0$ Вт/(м²·°C). На рис. 5 а, б, в показано скінченно-елементну сітку моделі диска (а), а також схеми його теплового (б) і механічного навантаження (в).

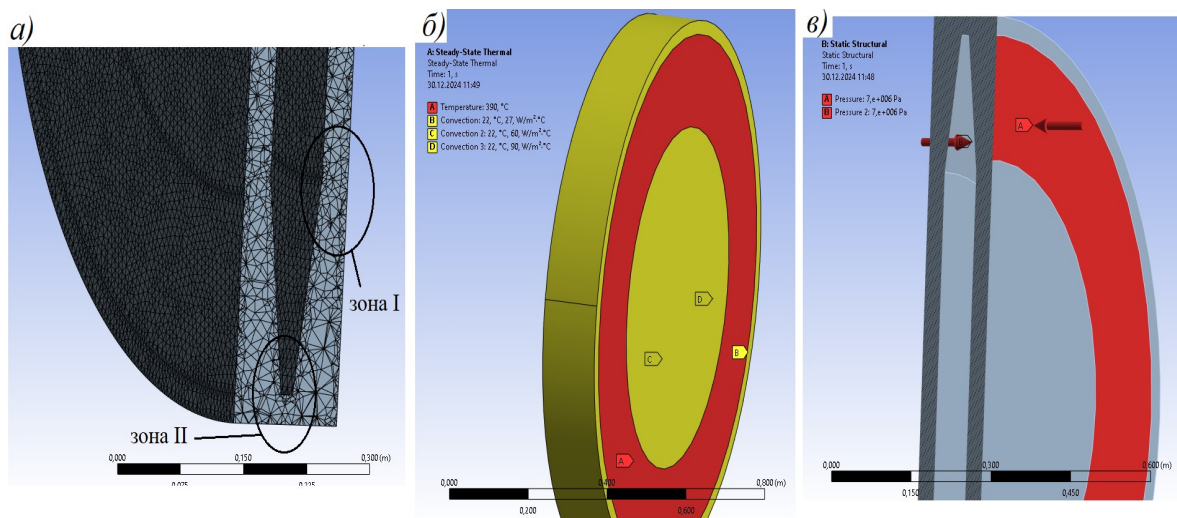


Рис. 5 – Скінченно-елементна сітка моделі диска (а), схеми теплового (б) і механічного (в) навантажень камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки
Fig. 5 – Finite element mesh of the disk model (a), thermal (b) and mechanical (c) load diagrams of the chamber disk-pad brake of the drilling winch

При моделюванні розглядали камерне дисково-колодкове гальмо бурової лебідки з товщиною диска: 100,0 мм; 120,0 мм і 140,0 мм.

На рис. 6 а, б, в наведено результати моделювання температурних напружень дисково-колодкового гальма при різних товщинах диска: а – $b=100,0$ мм; б – $b=120,0$ мм; в – $b=140,0$ мм.

З аналізу даних табл. 1 і рис. 6 випливає:

- найбільші механічні напруження спостерігалися в зоні II над дифуззором. Вони виникають внаслідок дії імпульсних питомих навантажень на поясі тертя диска, які спричиняють стиснення диска і деформації в найтоншому його місці – над дифуззором (див. рис. 6);
- у зоні III виникають великі механічні напруження від дії імпульсних питомих навантажень на поясі тертя диска за малої товщини стінки його камери;

- при збільшенні товщини диска від 100,0 мм до 120,0 мм і при зростанні товщини стінки його камери на 15,0 та 25,0 мм механічні напруження в зоні II

зменшилися з 1154,2 МПа до 1029,6 МПа, тобто. на 10,8%. Але при збільшенні товщини диска з 120,0 мм до 140,0 мм у зоні III відбувається зростання механічних напружень на 15,3%;

- зі збільшенням товщини диска в 1,4 рази градієнти механічних напружень зменшилися від 46,9 МПа/мм до 35,1 МПа/мм, тобто на 25,2%, що позитивно впливає на стійкість до тріщиноутворення у зоні II.

За результатами аналізу даних табл. 1 і рис. 7 а, б випливає:

- найбільші температурні напруження спостерігалися в зоні I на мінімальному радіусі поясу тертя диска. Вони виникають внаслідок дії теплового навантаження у місцях найменшої товщини стінки камери диска, яка деформується внаслідок її інтенсивного нагрівання та дії гальмового моменту;

- зі збільшенням товщини диска в 1,4 рази товщина стінки його камери зростає в 2,14 рази, температурні напруження зменшуються з 246,2 МПа до 186,2 МПа, тобто, на 24,4%;

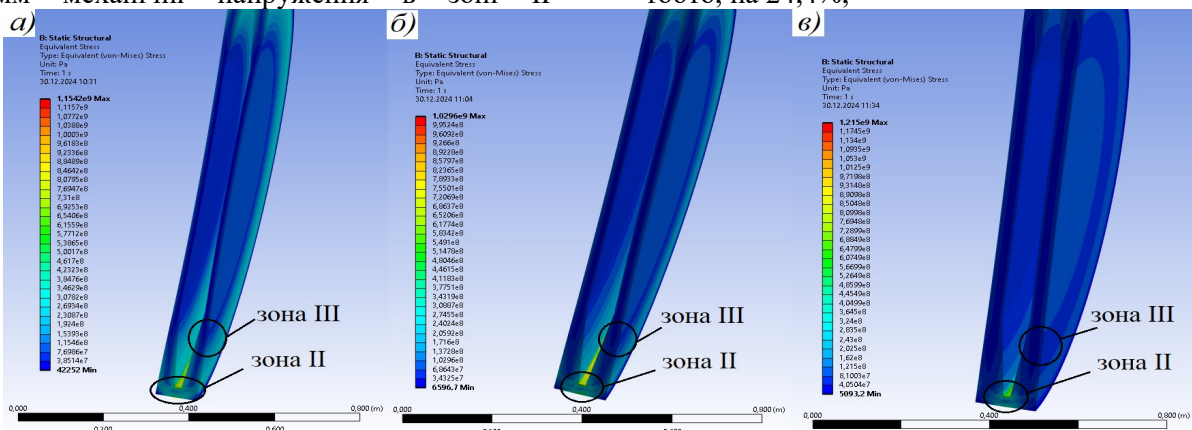


Рис. 6 – Результати моделювання механічних напружень у камерному дисково-колодковому гальмі при різних товщинах дисків: а – $b = 100,0$ мм; б – $b = 120,0$ мм; в – $b = 140,0$ мм

Fig. 6 – Results of modeling of mechanical stresses in a chamber disc-pad brake with different disc thicknesses: a – $b = 100.0$ mm; b – $b = 120.0$ mm; c – $b = 140.0$ mm

Таблиця 1

Результати скінченно-елементного моделювання еквівалентних напружень та їхніх градієнтів у камерному дисково-колодковому гальмі бурової лебідки

Table 1

Results of finite element modeling of equivalent stresses and their gradients in the chamber disc-pad brake of a drilling winch

D, мм	b, мм	$\delta_{ст}$, мм	$m_{д}$, кг	Максимальні еквівалентні напруження в диску, МПа				Градієнти напружень по товщині диска, МПа/мм		
				темпера- турні в зоні I	меха- нічні в зоні II	сумарні в зоні I	сумарні в зоні II	температурних в зоні I	механічних в зоні II	сумарних в зоні I
1200	100	15,0	433,3	246,2	1154,2	278,0	1209,7	5,94	46,9	9,26
	120	25,0	596,1	208,3	1029,6	242,7	1074,4	2,98	38,5	4,22
	140	35,0	758,9	186,2	1215,4	221,4	1256,2	2,09	35,1	2,71

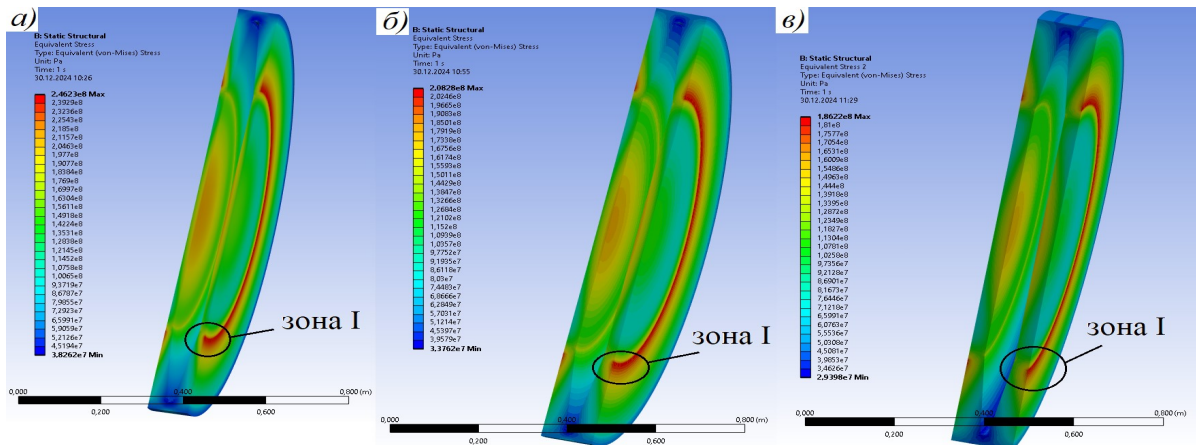


Рис. 7 – Результати моделювання температурних еквівалентних напружень в камерному дисково-колодковому гальмі при різних товщинах дисків: $a - b = 100,0$ мм; $б - b = 120,0$ мм; $в - b = 140,0$ мм

Fig. 7 – Results of modeling of temperature equivalent stresses in a chamber disc-pad brake at different disc thicknesses: $a - b = 100.0$ mm; $b - b = 120.0$ mm; $c - b = 140.0$ mm

- зі збільшенням товщини диска 1,4 рази градієнт температурних напружень зменшився з 5,94 МПа/мм до 2,09 МПа/мм, тобто. на 64,8%, що позитивно впливає на стійкість до тріщиноутворення у зоні I стінки.

За результатами аналізу даних табл. 1 і рис. 8 а, б впливає:

- розподіл сумарних еквівалентних напружень має чітко виражені зони I і II, що є результатом дії температурних і механічних навантажень на пояс тертя диска. Встановлено, що зі збільшенням товщини диска сумарні еквівалентні

напруження на поверхні його поясу тертя зменшуються, поверхневі градієнти і по товщині також зменшуються;

- при збільшенні товщини диска в 1,4 рази товщина стінки його камери зростає в 2,14 рази, сумарні еквіваленти напруження в зоні I знизилися з 278,0 МПа до 221,4 МПа, тобто на 25,6%. У зоні II диска вони спочатку зменшилися з 1154,2 МПа до 1029,6 МПа, а далі зросли до 1215,4 МПа;

- градієнти температурних напружень зменшилися з 9,26 МПа/мм до 2,71 МПа/мм, тобто, у 3,4 рази, що сприяє стійкості до тріщиноутворення.

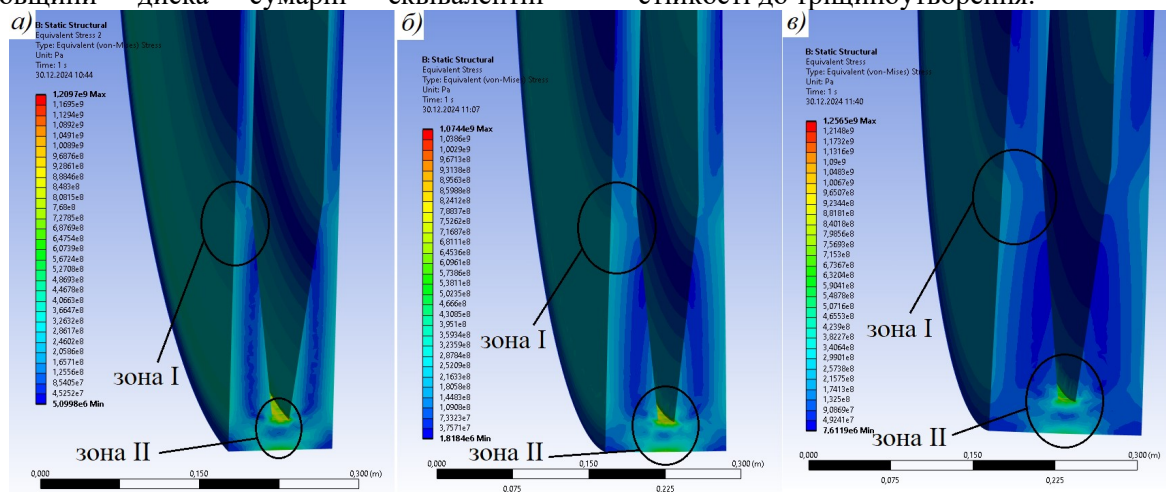


Рис. 8 – Результати моделювання сумарних еквівалентних напружень камерного дисково-колодочного гальма при різних товщинах дисків: $a - b = 100,0$ мм; $б - b = 120,0$ мм; $в - b = 140,0$ мм

Fig. 8 – Results of modeling the total equivalent stresses of a chamber disc-pad brake at different disc thicknesses: $a - b = 100.0$ mm; $b - b = 120.0$ mm; $c - b = 140.0$ mm

Інтенсифікація циклів тепловідведення із зон випаровування, транспорту і конденсації нанорідини в будь-якому її агрегатному стані сприяє підвищенню

ефективності гальмування дисково-колодковим гальмом бурової лебідки при спуску колони бурильних труб у свердловину

Ефективність охолодження

Мінімальний коефіцієнт взаємного перекриття пари тертя дисково-колодкового гальма і, як наслідок, підвищені питомі навантаження фрикційних накладок на гальмовий диск висувають особливі вимоги до конструювання та підбору матеріалів вузла тертя. Температура, що встановилася, у дисково-колодкових гальм на 30...35% нижче, ніж у барабанно-колодкових відповідної потужності тертя через збільшення тепловіддавальної поверхні контртіла, але енергонавантаженість фрикційної пари залишається напруженою. Зниження енергонавантаженості може бути досягнуто раціональною конструкцією фрикційної пари, насамперед гальмового диска. Тепловідвідна здатність останнього залежить як від його теплопровідності, так і від площі

поверхні, що омивається зустрічним потоком повітря.

В даному випадку новий тип гальмового диска в процесі аперіодичного гальмування має зовні матові та поліровані поверхні, які омиваються потоками повітря, а зсередини – нанорідиною, яка з часом перетворюється на вологу, суху та перегріту пару.

Установлений і термо-стабілізаційний тепловий стан пояса тертя диска спостерігатиметься нетривалий час. У цих випадках тепловий баланс буде квазіпостійним.

Відповідно до рис. 9 здійснимо оцінку теплового балансу при вимушеному повітряному та примусовому нанорідинному охолодженні металевого фрикційного елемента:

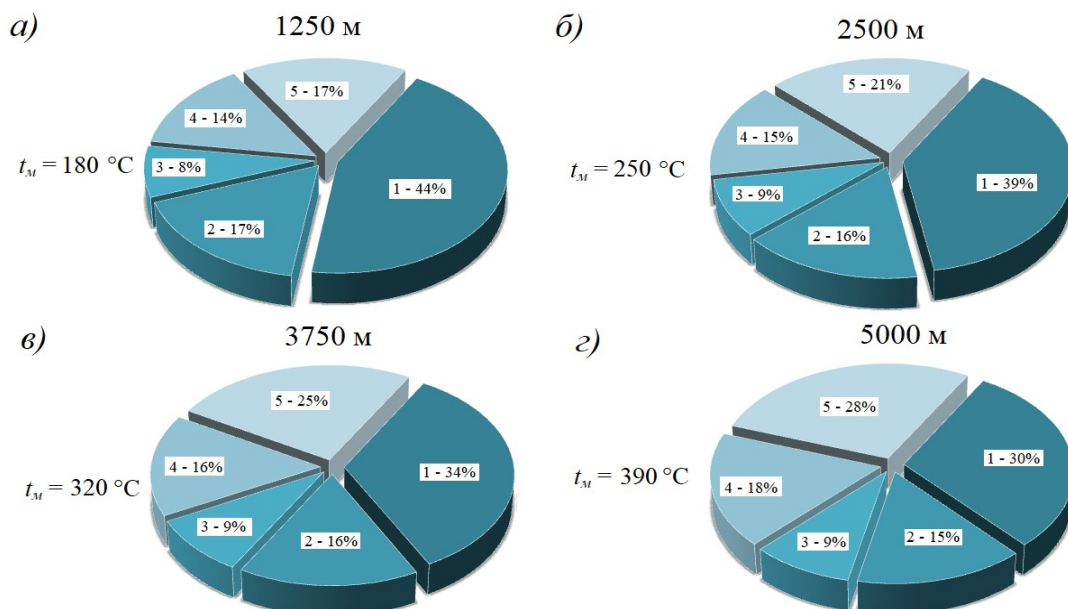


Рис. 9 – Тепловий баланс при спуску колони бурильних труб на різні глибини у свердловину при теплообміні: 1 – теплопровідністю; 2 – конвекцією; 3 – радіацією; 4 – нагрівання з темпом; 5 – примусове нанорідинне охолодження з темпом

Fig. 9 – Heat balance when lowering the drill string to different depths in the well during heat exchange: 1 – thermal conductivity; 2 – convection; 3 – radiation; 4 – heating with a rate; 5 – forced nanofluid cooling with a rate

- при обертанні гальмового диска з різною частотою відношення охолоджуваної до нагріваної площі не буде постійним, оскільки вузол проходить чергування режимів роботи дифузора і конфузора;

- зі спуском колони бурильних труб на різні глибини в свердловину має місце збільшення частоти обертання диска, що

позначається на інтенсивності нанорідинного охолодження;

- робочі шари фрикційних накладок не досягатимуть температури деструкції (390°C), що не вплине на помітне зменшення динамічного коефіцієнта тертя фрикційних пар гальма.

- спостерігається квазіпостійний тепловий режим складного теплообміну із та-

кими середніми показниками: теплопровідність – 36,0%; конвекція – 16,0%; радіація – 9,0%; з темпом нагрівання та примусового охолодження, відповідно, 15,0% та 23,0%;

- робочі поверхні фрикційних накладок знаходяться в частковому деструкційному стані завдяки ефективному примусовому охолодженню, що досягло 28,0%

Експлуатаційні параметри гальм

Дослідно-конструкторські розробки, теоретичні дослідження та натурно-обчислювальний експеримент щодо нового типу камерного дисково-колодкового гальма з нанорідним охолодженням бурової лебідки при оцінці працездатності дозволили встановити закономірності зміни експлуатаційних параметрів у вигляді графічних залежностей побудованих у форматі 3D.

З графічних залежностей рис. 10 та рис. 11 а б слідує, що при електротермомеханічному терті при складному теплообміні головною є теплопровідність і термічний опір гальмових дисків.

Сформовано ряди конструктивних та експлуатаційних параметрів дисково-колодкових гальм із гідравлічним приводом при бурінні свердловини на глибину 5357,4 м.

Розглянемо особливості побудови рядів та відзначимо зміну параметрів у технологічному процесі, що дозволило встановити таке:

- при постійних інтервалах робочих площ накладок (0,05 - 0,09)м² і радіусах дисків (0,6-1,0)м при зміні динамічних коефіцієнтів тертя від 0,25 до 0,45 отримані величини гальмових моментів, що розвиваються від (384,0 -2462,4) кНм за імпульсних питомих навантажень від 6,4 МПа до 7,6 МПа, тобто у вузькому інтервалі їх зміни;

- відношення теоретичних вище параметрів складає: $0,09/0,05 = 1,8$; $1,0/0,5 = 2,0$; $0,45/2,25 = 1,8$; $7,6/6,4 = 1,2$ та $2462,4/384,0 = 6,4$. Відношення максимального гальмового моменту пар тертя до мінімального становило 6,4, що підтвердило правильність обчислювального експерименту.

У табл. 2 наведено порівняння основних експлуатаційних параметрів серійного та розробленого дослідно-конструкторського зразка дисково-колодкових гальм з гідравлічним приводом бурової лебідки.

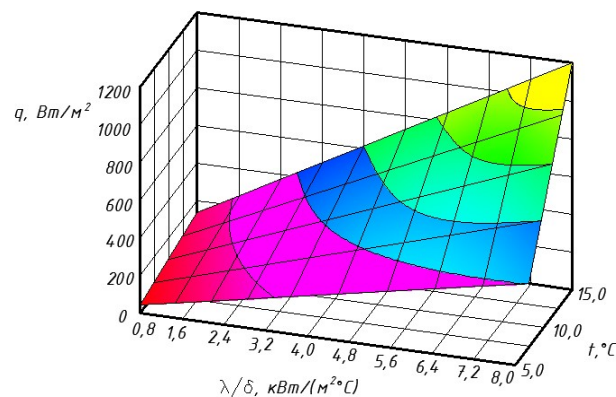


Рис. 10 – Закономірності зміни теплового потоку q , що пронизує пояс тертя гальмового диска при фрикційній взаємодії пари тертя «накладка-диск» гальма, залежно від параметра λ/δ та об'ємної температури в тілі диска

Fig. 10 – Regularities of change of heat flux q , penetrating the friction zone of the brake disc during frictional interaction of the friction pair “pad-disc” of the brake, depending on the parameter λ/δ and the bulk temperature in the disc body

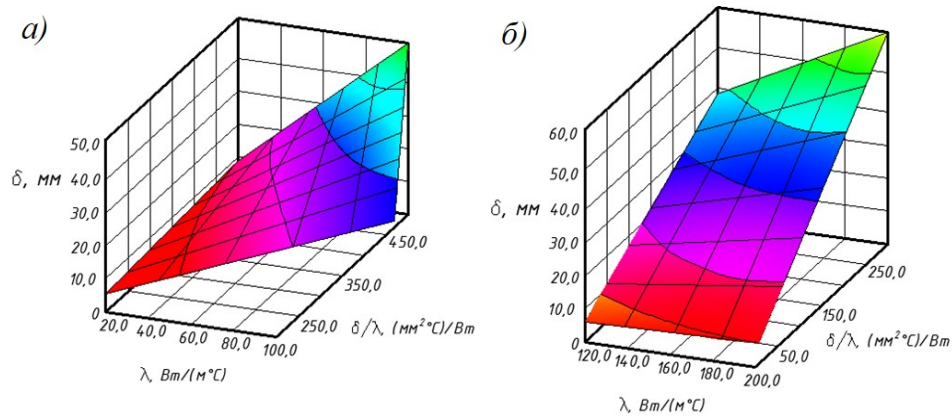


Рис. 11 – Закономірності зміни термічного опору (δ/λ) гальмових дисків залежно від їх товщини (δ) та коефіцієнтів теплопровідності матеріалів (λ), що змінюються в межах: а – (20...100) Вт/(м·°C); б – (120 ... 200) Вт/(м·°C)

Fig. 11 – Regularities of change in thermal resistance (δ/λ) of brake discs depending on their thickness (δ) and thermal conductivity coefficients of materials (λ), which vary within the following limits: а – (20...100) W/(m·°C); б – (120 ... 200) W/(m·°C)

Таблиця 2

Основні експлуатаційні параметри серійного та розробленого дисково-колодкового гальма з гідравлічним приводом

Table 2

Main operating parameters of the serial and developed hydraulically actuated disc-pad brake

№ п/п	Експлуатаційні параметри	Пари тертя гальма		
		серійного	розробленого до глибини буріння, м	
			5000	9000
1.	Вага(кН) гальмового диска Вага (кН) нанорідини	7,75 -	5,68 0,313	
2.	Момент інерції диска, кг·м ²	1,642	1,2	
3.	Гальмовий момент, кНм	322,56	399,84	995,1
4.	Потужність тертя, кВт	590,28	731,70	1820,85
5.	Динамічний коефіцієнт тертя f	0,31	0,36	0,39
	стабільність, $\alpha_{cm} = f_{cp} / f_{max}$	0,9	0,916	0,907
	коливання, $\alpha_k = f_{min} / f_{max}$	0,79	0,83	0,85
6.	Гальмування: ефективність, $\beta_{ef} = \alpha_{cm} / \tau_1^2, 1/с$	0,00625	0,00643	0,00629
	зведена ефективність $H_{em} = \alpha_{cm} / (\tau_1^2 \cdot \Delta g), 1/(с^2 \cdot г)$	$4,66 \cdot 10^{-4}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$	$3,32 \cdot 10^{-4}$
7.	Питомі навантаження, p , МПа	3,2	3,4	7,6
8.	Поверхнево-об'ємні температури, °C / та їх градієнти, °C/с	358/2,4	340/4,39	390/6,5
9.	Темпи нагрівання, °C/с Темпи охолодження, °C/с	6,13 3,15	5,5 4,15	7,9 6,4
10.	Коефіцієнти теплопередачі примусового охолодження, К, Вт/(м ² ·°C):			
	повітряного	6,4	26,67	27,14
	нанорідинного	-	62,85	86,13
11.	Температурні напруження / їх градієнти, МПа / (МПа/мм)	601,3 / 3,86	618,95 / 4,22	789,4 / 2,71
12.	Зношування робочих поверхонь накладок, Δg , г	13,4	12,8	18,9

З табл. 2 слідує, що при нанорідинному охолодженні пар тертя камерним дисково-колодковим гальмом

досягнуто поліпшення їх експлуатаційних параметрів, і як наслідок, підвищилася працездатність.

Висновки

Теоретичні та експериментальні дослідження примусового повітряно-нано-рідинного охолодження камерного дисково-колодкового гальма бурової лебідки дозволили встановити таке.

1. Досягається покращення зносо-фрикційних властивостей пар тертя за рахунок експлуатації гальма в інтервалі температур, нижчих за допустиму для матеріалу фрикційних накладок, і, як наслідок, гальмових якостей для підйомного вала бурової установки та півосей транспортних засобів.

3. Об'єми нанорідини в зонах випаровування мають бути набагато меншими, ніж у зонах її транспорту, що інтенсифікує теплообмін у різному агрегатному стані нанорідини за рахунок збільшених циклів її циркуляції.

4. Визначено інтенсивність вимушеного повітряного теплообміну матових і полірованих поверхонь диска конвекцією, радіацією і теплопровідністю і кількість теплоти, відведеної від нього при гальмуваннях.

5. Прискорювачами руху нанорідини в будь-якому її агрегатному стані між зонами випаровування, транспорту і конденсації є дифузори, сповільнювачем – наноструктура зон конденсації і транспорту диска, яка спричиняє зміну градієнтів швидкості, тиску і температури у шарах нанорідини.

6. За допомогою методу кінцево-елементного моделювання оцінено напружено-деформований стан бокової стінки камерного диска зі змінною товщиною його поясу тертя і з урахуванням специфіки охолодження.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Aliyev A. M. The analysis of power consumption of frictional brakes for trip operations. *HERALD of the Azerbaijan Engineering Academy*. 2018. Vol.10, № 4. Pp.17-22.
2. Kragelskii I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. Friction and Wear: Calculation Methods. Oxford : Pergamon Press, 1982. 474 p.
3. Примусове охолодження фрикційних вузлів гальм (ч. 1) / О. І. Вольченко, В. С. Скрипник, Д. Ю. Журавльов, О. С. Бурава, А. В. Возний, О. М. Семеній. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. Вип. 3 (104). С. 112-121. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18996](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18996)
4. Примусове охолодження фрикційних вузлів гальм (ч. 2) / М. В. Кіндрачук, Д. О. Вольченко, Є. Ю. Андрейчиков, А. В. Возний, О. М. Вудвуд, С. А. Скочко. *Проблеми тертя та зношування*. 2024. Вип. 3 (104). С. 122-131. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18997](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18997)
5. Complex Heat Exchange in Friction Steam of Brakes / I. Kernytskyy et al. *Energies*. 2022, no 15, Art 7412, Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197412>
6. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes / M. Kindrachuk et al. *East.-Europ. Journ. of Enterp. Technol.* 2023. No 4(12(124)). Pp. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699>
7. Калінкевич М. Гідродинамічна конструкція дифузорові відцентрових компресорів. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. no 59(4). Pp. 230-243. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2730>
8. Аеродинамічне дослідження вісерадіальних дифузорові для осьового компресора газотурбінної установки / Ю. О. Юдін, В. П. Суботович, О. В. Лапузін, І. І. Малимон. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 3. С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.04>
9. Розрахункове аеродинамічне дослідження вихлопного дифузора потужної парової турбіни в широкому діапазоні режимів роботи / Ю. О. Юдін, В. П. Суботович, О. В. Лапузін, І. І.

- Малимон. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2020. № 1. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.01>
10. Нанорідини в системах охолодження і їх ефективність / Д. А. Вольченко, М. В. Кіндрачук, Б. В. Долішній, А. В. Баліцький. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2021. Т. 13, № 4. С. 04013-1–04013-6. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(4\).04013](https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04013)
 11. A Review of Nanofluids as Coolants for Thermal Management Systems in Fuel Cell Vehicles / Ahmed S. F., Alazwari M., Said Z. et al. *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, No. 21. P. 2861. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13212861>
 12. Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System / Balitskii A., Kindrachuk M., Volchenko D., Karol F. Abramek, Balitskii O., Skrypnyk V., Zhuravlev D., Bekish I., Ostashuk M., Kolesnikov V. *Energies*. 2022. Vol. 15, no 59. Pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010059>
 13. Advances of nanofluids in heat exchangers – A review / Bhatti M. M., Rashidi M. M., Freidoonimehr N. et al. *Heat Transfer – Asian Research*. 2020. Vol. 49, No. 8. P. 4987–5009.
 14. Menni Y., Chamkha A. J., Ameer H. Advances of nanofluids in heat exchangers—A review. *Heat Transfer*. 2020. No 49. Pp. 4321–4349. <https://doi.org/10.1002/htj.21829>
 15. Improving the heat transfer characteristics of miniature two-phase thermosyphons with nanofluids based on Ukrainian natural aluminosilicates / Moraru V. N., Komysh D. V., Khovavko A. I., Snigur A. V., Gudkov N. N. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, No. 8(117). P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286320>
 16. Rymar T. Use of water-TiO₂ nanofluid in horizontal slinky collector of heat pump. *Energy Engineering and Control Systems*. 2022. Vol. 8, No. 1. Pp. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2022.01.007>
 17. Aksonov O., Zolotko O. Analysis of the nozzle impact on the characteristics of the pulse detonation engine. *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC-2024)*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.52202/078371-0112>
- Dimet Laval nozzle expansion section analysis and optimization / Kun T., Jie H. W., Markovych S., Wang Y. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8(2). Pp. F6-F10, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).f2)

Отримано: 03.04.2026 / Переглянуто: 07.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹ **VOLCHENKO O.**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Construction and Road-Building Machinery

e-mail: vol21@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0388-8351>

² **VOZNYI A.**, PhD, associate professor of the Department of Information and Telecommunication Technology and Systems

e-mail: andrii.voznyi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4938-1294>

³ **VUDVUD O.**, PhD, Associate professor, Head of the Department of Lifting, Transport and Robotic Equipment

e-mail: alex.vudvud@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4807-3634>

¹ **SEMENIY O.**, Graduate student of the Department of Construction and Road Machinery

e-mail: alexander.psy@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-2464-6508>

² **ANDREYCHIKOV Ye.**, lieutenant colonel, senior lecturer of the Department of Military Training

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4579-3636>

¹ *Kharkiv National Automobile and Highway University*

Yaroslava Mudrogo str. 25, 61002, Kharkiv, Ukraine

² *Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*

15 Karpatska St., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine

³ *Odessa National Polytechnic University*

1 Shevchenko Ave., 65044, Odesa, Ukraine

DESIGN OF AN EFFICIENT CHAMBERED DISC-PAD BRAKE

The materials of the article consider the optimization design of friction pairs of a chamber-type disc-shoe brake taking into account the restrictions on the design and operational parameters. The design and operation of a chamber disc-shoe brake of a drilling winch are presented, with a brake disk consisting of two half-disks of variable thickness, the larger of which corresponds to the maximum radius of the friction zone, and the smaller one to its minimum radius. As a heat carrier in the disk chamber in the cooling system, low-melting Li in the form of a powder mixed with water was used. Using the force method, the inertia forces, radial and tangential forces acting on the chamber disk and nanofluid in the volume of the chamber were determined. The stress-strain state of the disk was simulated to study mechanical and thermal stresses using the Ansys Workbench program. The values of the maximum equivalent stresses and stress gradients along the thickness of the chamber disk were determined and analyzed. The efficiency of nanofluid cooling was assessed using the thermal balance of the chamber disk. The thermal balance was assessed during forced air and forced nanofluid cooling of a metal friction element. Experimental and design developments, theoretical studies, and a full-scale computational experiment on a new type of chamber disc-pad brake with nanofluid cooling allowed us to establish the regularities of changes in operational parameters in the form of graphical dependencies. The main operational and heat exchange parameters of the serial and developed disc-pad brake of a drilling winch were compared. The wear and friction properties of friction pairs were improved by operating the brake in a temperature range lower than that permissible for the friction lining material, and, as a result, the braking qualities for the lifting shaft of the drilling rig.

KEYWORDS: *drilling winch, disc-pad brake, friction unit, brake disc, brake disc chamber, nanofluid, stress-strain state*

In cites: Volchenko O., Voznyi A., Vudvud O., Semeni O., Andreychikov Ye. (2026). Design of an efficient chambered disc-pad brake. *Engineering*, (37), 137-152. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-12> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Aliyev, AM 1982. 'The analysis of power consumption of frictional brakes for trip operations / A.M.Aliyev', *HERALD of the Azerbaijan Engineering Academy*, Vol. 10, no 4, art 2018, Pp.17-22.
2. Kragelskii, IV, Dobychin, MN, Kombalov, VS 1982, *Friction and Wear: Calculation Methods*, Pergamon Press, Oxford.
3. Volchenko, OI, Skrypnyk, VS, DYU, Zhuravlov, Burava, OS, Voznyi, AV & Semeni, OM 2024, 'Prymusove okholodzhennia fryktsiinykh vuzliv halm (chastyna 1)' [Forced cooling of friction units

- of halms (part 1)], *Problemy tertia ta znoshuvannia*, iss. 3 (104), Pp. 112-121. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18996](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18996) (in Ukraine)
4. Kindrachuk, MV, Volchenko, DO, Andreichykov, YeYu, Voznyi, AV, Vudvud, OM & Skochko, SA 2024, 'Prymusove okholodzhennia fryktsiinykh vuzliv halm (chastyna 2)' [Forced cooling of friction units of halms (part 2)], *Problemy tertia ta znoshuvannia*, iss 3 (104), Pp. 122-131. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18997](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18997) (in Ukraine)
 5. Kernytskyi, I, Volchenko, A, Szlachetka, O, Horbay, O, Skrypnyk, V, Zhuravlev, D, Bolonnyi, V, Yankiv, V, Humenuyk, R, Polyansky, P, Le'sniewska, A, Walasek, D & Koda, E 2022, 'Complex Heat Exchange in Friction Steam of Brakes', *Energies*, no 15, Art 7412, Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197412> (in Ukraine)
 6. Kindrachuk, M, Volchenko, D, Fidrovskaya, N, Dukhota, A, Zhuravlev, D, Ostashuk, M, Porokhovskiy, Y & Kharchenko, V, 2023, 'Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes', *East.-Europ. Journ. of Enterp. Technol*, no 4(12(124)), Pp. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699> (in Ukraine)
 7. Kalinkevych, MV 2024, 'Hidrodynamichna konstruktsiia dyfuzoriv vidtsentrovnykh kompresoriv' [Fluid dynamic design of centrifugal compressor diffusers], *Refrigeration Engineering and Technology*, no 59(4), Pp. 230-243. DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2730> (in Ukraine)
 8. Iudin, YuO, Subotovych, VP, Lapuzin, OV & Malymon, II 2019, 'Aerodynamichne doslidzhennia viseradiialnykh dyfuzoriv dlia osovoho kompresora hazoturbinnoi ustanovky' [Aerodynamic studies of all-radial diffusers for an axial compressor of a gas turbine installation], *Visnyk NTU «KhPI»*, no 3, Pp. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.04> (in Ukraine)
 9. Iudin, YuO, Subotovych, VP, Lapuzin, OV & Malymon, II 2020, 'Rozrakhunkove aerodynamichne doslidzhennia vykhlopnoho dyfuzora potuzhnoi parovoi turbiny v shyrokomu diapazoni rezhymiv roboty' [Computational aerodynamic studies of the exhaust diffuser of a powerful steam turbine in a wide range of operating modes], *Visnyk NTU «KhPI»*, no 1, Pp. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2020.01.01> (in Ukraine)
 10. Volchenko, DA, Kindrachuk, MV, Dolishnyi, BV & Balitskyi, AV 2021, 'Nanoridyny v systemakh okholodzhennia i yikh efektyvnist' [Nanofluids in cooling systems and their effectiveness], *Zhurnal nano- ta elektronnoi fizyky*, Vol. 13, no 4, Pp. 04013 1–04013 6. DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(4\).04013](https://doi.org/10.21272/jnep.13(4).04013) (in Ukraine)
 11. Ahmed, SF, Alazwari, M, Said, Z et al 2023, 'A Review of Nanofluids as Coolants for Thermal Management Systems in Fuel Cell Vehicles', *Nanomaterials*, Vol. 13, No. 21, P. 2861. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano13212861>
 12. Balitskii, A, Kindrachuk, M, Volchenko, D, Karol, F, Abramek, Balitskii, O, Skrypnyk, V, Zhuravlev, D, Bekish, I, Ostashuk, M & Kolesnikov, V 2022, 'Hydrogen Containing Nanofluids in the Spark Engine's Cylinder Head Cooling System', *Energies*, vol. 15, no 59, Pp. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15010059>
 13. Bhatti, MM, Rashidi, MM, Freidoonimehr, N et al 2020, 'Advances of nanofluids in heat exchangers – A review', *Heat Transfer – Asian Research*, Vol. 49, No. 8, Pp. 4987–5009.
 14. Menni, Y, Chamkha, AJ & Ameer, H 2020, 'Advances of nanofluids in heat exchangers—A review', *Heat Transfer*, no 49, Pp. 4321–4349. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21829>
 15. Moraru, VN, Komysh, DV, Khovavko, AI, Snigur, AV & Gudkov, NN 2022, 'Improving the heat transfer characteristics of miniature two-phase thermosyphons with nanofluids based on Ukrainian natural aluminosilicates', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 8(117), P. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286320>
 16. Rymar, T 2022, 'Use of water-TiO₂ nanofluid in horizontal slinky collector of heat pump', *Energy Engineering and Control Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.007>
 17. Aksonov, O & Zolotko, O 2024, 'Analysis of the nozzle impact on the characteristics of the pulse detonation engine', *Proceedings of the International Astronautical Congress (IAC-2024)*. DOI: <https://doi.org/10.52202/078371-0112>
 18. Kun, T, Jie, HW, Markovych, S & Wang, Y 2021, 'Dimet Laval nozzle expansion section analysis and optimization', *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8(2), pp. F6-F10, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).f2)

Submission received: 04.03.2026/Revised: 05.07.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13>

УДК 624.132.3

- ¹ СУПОНЕВ В. М., доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації, випробувань, сервісу будівельних і дорожніх машин
e-mail: v-suponev@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>
- ¹ РАГУЛІН В. М., кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова
e-mail: ragulinrvn@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>
- ² ТХОРУК Є. І., кандидат технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин
e-mail: ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>
- ² КРАВЕЦЬ С. В., доктор технічних наук, професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин
e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4063-1942>
- ¹ ЛЕМЕЦЬ О. О., аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова
e-mail: m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-9736>
- ¹ КУЛІКОВ М. О., магістрант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова
e-mail: Nikitakulikovgg@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6871-3812>
- ¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002
- ² Національний університет водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000

РІВНЯННЯ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ ГОЛОВКИ В ҐРУНТІ З УМОВИ ЇЇ КОРЕКЦІЇ ТА ЇЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА

Основним обмеженням методу є відхилення траєкторії руху інструменту від проектної траєкторії через різні фактори, такі як неоднорідність ґрунту та неточності позиціонування. Це обмежує застосування методу короткими відстанями до 15–20 м. Для підвищення точності проколу пропонується корекція траєкторії робочого органу шляхом адаптації геометрії наконечника (головки). У разі відхилення від проектної траєкторії використовується наконечник з асиметричною геометрією, що створює контрольований дисбаланс сил взаємодії з ґрунтом. Це дозволяє цілеспрямовано керувати рухом головки під час проколу, дозволяючи коригувати траєкторію без переривання процесу та без додаткового втручання в систему.

Проведене дослідження призвело до розробки математичної бази, що включає відповідні рівняння для корекції траєкторії робочого органу. Були враховані ключові параметри, такі як тип ґрунту, його фізичні властивості та кут нахилу наконечника. Отримані співвідношення дозволяють прогнозувати поведінку системи та надають можливість покращити точність проколу за різних умов експлуатації.

Аналіз експериментальних даних показав, що найбільші відхилення траєкторії відбуваються при менших кутах нахилу наконечника, тоді як зі збільшенням кута цей ефект поступово зменшується. Крім того, глинисті ґрунти демонструють найменші відхилення порівняно з іншими типами ґрунтів. Зокрема, на відстані 10 м та куті нахилу 25° відхилення в супіску становило близько 40 мм, тоді як у глині – приблизно 20 мм. При збільшенні кута до 55° ці значення зменшуються до 14 мм у супіску та 13 мм у глині відповідно. Подальше збільшення кута до 70° показало, що вплив кута нахилу стає незначним і більше не впливає суттєво на відхилення траєкторії. Водночас розбіжність між експериментальними результатами та теоретичними розрахунками не перевищує 15%, що свідчить про достатню точність запропонованої моделі та підтверджує її адекватність у реальних умовах експлуатації.

Отримані результати відкривають нові можливості для підвищення точності та ефективності прокладання підземних комунікацій. Зокрема, вони дозволяють збільшити довжину проколу без втрати керованості процесу та розширюють можливості застосування методу статичного проколу в складних інженерно-геологічних умовах, забезпечуючи більш надійне та передбачуване виконання операцій.



КЛЮЧОВІ СЛОВА: безтраншейна технологія, статичний прокол ґрунту, інженерні комунікації, робочий орган, що проколює, корекція траєкторії руху, бурова штанга, свердловина.

Як цитувати: Супонев В. М., Рагулін В. М., Тхорук Є. І., Кравець С. В., Лемець О. О., Куліков М. О. Рівняння траєкторії руху головки в ґрунті з умови її корекції та їх експериментальна перевірка. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 153-163. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13>

Вступ

Під час горизонтально-спрямованого проколу ґрунту малогабаритними установками статичної дії виникає потреба коригувати траєкторію руху робочого органу. Відхилення робочого органу з конусним наконечником можуть відбуватися з різних причин: не точним

розташуванням установки щодо осі на початку проколу; при зустрічі робочого органу з деяким шаром щільнішого ґрунту; за рахунок вигину довгої штанги та діаметру. Тому коригування траєкторії проколу необхідне і пошук ефективних рішень є актуальним.

Аналіз публікацій

Горизонтально направлене буріння (ГНБ) – це технологія безтраншейної прокладки трубопроводів, яка швидко розповсюджується останніми роками по усьому світі. [1]. ГНБ широко використовується для прокладання нафтогазопроводів, силових кабелів та інших комунікаційних мереж [2]. До суттєвих переваг цієї технології можна віднести високу ефективність, екологічність та скорочення обсягу земляних робіт. Це зробило технологію ГНБ більш важливою для великомасштабних інфраструктурних проєктів [3]. Вона поєднує в собі безліч технологій та обладнання [4]. Процес прокладання трубопроводу складається з пілотного буріння, попереднього розширення та зворотного протягування трубопровідної нитки у створену свердловину [5]. Точність прогнозування навантажень на всіх етапах процесу впливає на вибір бурової установки і проєктування міцності трубопроводу та його бурових штанг, що має значення для забезпечення безпечної та надійного прокладання трубопроводів [6]. Зокрема, при збільшенні кількості великомасштабних проєктів з прокладання трубопроводів великої довжини і великих діаметрів трубопроводів, якщо розрахунок навантаження зворотного протягування труби неточний, легко може статися застрягання трубопроводу, що призведе до значних економічних втрат [3].

Сили, що діють на штангу при проколі або трубопроводу під час його протягування, складні. Розрахунок

навантажень при протяжці вимагає знання трибології, а також механіки рідини, пружності та ґрунтів. Навантаження, що діють під час протягування трубопроводу можна умовно поділити на частини [7,8]: (1) сила тертя між трубопроводом і поверхнею землі або роликом, (2) сила тертя між трубопроводом і стінкою свердловини (включаючи силу тертя, викликану чистою вагою трубопроводу та ефектом вигину). Результируюча цих сил у напрямку зворотного ходу складає навантаження зворотного ходу. На основі цього існують розроблені практичні методики [8], що стимулюють підвищення ефективності ГНБ технології [9].

Ще траєкторія свердловини ГНБ зазвичай включає прямі та вигнуті ділянки [10]. Коли трубопровід перетинає вигнуту ділянку [11], через зміну напрямку пілотної свердловини, зовнішнє навантаження, яке прикладена до стінки свердловини, збільшується, що відомо, як ефект лебідки [11]. Збільшення зовнішнього навантаження призводить до додаткових навантажень при зворотньому ході. Модель PRCI [12] та модель ASTM [11] враховують вплив ефекту лебідки [13]. Крім того, сила опору бурового розчину моделі ASTM розраховується з урахуванням балансу сил, що діють на зазор рідини в свердловині через різницю тисків і бічних сил зсуву, що діють на стінки труби і свердловини [14].

В даний час існують деякі недоліки досліджень прогину бурової штанги і труби при використанні технології ГНБ.

Існуючи розрахунок не враховують зміни якості ґрунту в навколишньому просторі при статичному проколі ґрунту та його впливу на процеси формування лідерної свердловини та її розширення були розглянуті в роботі [8] та [9]. Вплив фізико-механічних властивостей трубопроводу, що затягується у свердловину на її траєкторію наводиться в роботах [16] та доведено дослідженнями [17]. Важливість дотримання проектно вказується в [18]. Характер траєкторії свердловини з умови надійної роботи бурових штанг розглядається в роботі [17]. Важливість

дотримання траєкторії проколу з умови зберігання цілості штанг наводиться в роботі [19]. Напрями удосконалення керуванням процесу статичного проколу ґрунту та конструкції бурової головки показано в роботах [20] та [21].

Метою роботи є теоретичне обґрунтування методології оперативної корекції траєкторії проколу ґрунту та її експериментальна перевірка, які дозволять виробити вимоги до конструкцій: проколюючої голівки, апаратури за її розташуванням у масиві ґрунту та силового блоку її переміщення та коригування.

Встановлення рівняння руху ґрунтопроколюючої головки в ґрунті

Відомо, що для зміни напрямку руху під час роботи машини горизонтально-спрямованого буріння (ГСБ) під час формування лідерної свердловини з криволінійною траєкторією використовується бурова головка зі скошеною лобовою поверхнею. При статичному задавлюванні цієї головки в ґрунт виникає поперечна сила від реакції ґрунту, яка зміщує її рух у протилежний бік від скосу лобової поверхні [8-10].

Сучасні технології дозволяють визначити координати місця знаходження головки у ґрунті з досить високою точністю. При керуванні бурінням свердловини машинами ГСБ використовують зазвичай електромагнітні, лазерні та кабельні методи локації таких відомих виробників, як DigiTrax, Spot-d-Nek, PipeHawkGPR та інші. Це досить складні та дорогі пристрої. Для коригування рухом головки, що проколює, на відносно невеликих глибинах можна використовувати вітчизняну пошукову установку СПРУТ- 5 Дніпровської фірми "КРОМ", яка має досить високу точність визначення її місцезнаходження, яка становить до 2 см на глибині до 3 м.

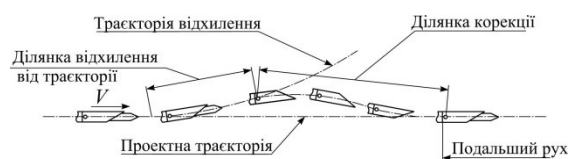


Рис. 1 – Принцип корекції траєкторії руху головки в ґрунті

Fig. 1 – Principle of correction of the trajectory of the head movement in the soil

Таким чином, якщо форму наконечника головки, що проколює, буде можливим оперативно змінювати і обертати, то можна буде коригувати траєкторію її руху в ґрунті (рис. 1). Вирішення цього питання дозволить збільшити довжину підземних прольотів проколу високоефективним статичним методом у кілька разів, а саме від 15 або 20 м гарантованої точності до 100 м. Саме після 100 м починається ефективне використання більш складних і дорогих машин ГСБ.

Встановлено, що використання проколюючого органу зі скошеною поверхнею дозволяє керувати траєкторією його руху та проводити проколи деякою криволінійною траєкторією [8, 9, 10]. Для прямолінійного проколу ґрунту застосовні лише симетричні робочі органи, для корекції проколу – головка зі скошеною поверхнею.

Допускається відхилення від проектної точки виходу проколюючої головки в котловані, що приймається, по горизонту в межах ± 40 см, а по вертикалі ± 20 см при прольоті проколу до 20 м. Якщо відстань від точки критичного відхилення до приймального котловану ще є досить великим, то необхідно провести корекцію проколу. Для встановлення умови ефективної траєкторії руху проколюючої голівки розглянемо схему її просування в ґрунті (рис.2), з якої видно, що процес корекції руху проколюючої голівки відбувається не одночасно, а поступово.

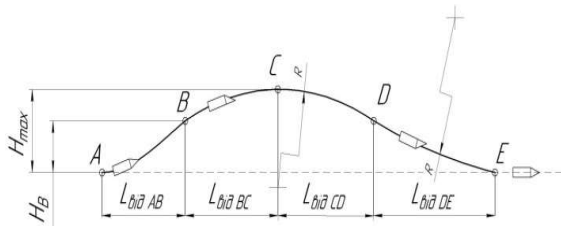


Рис. 2 – Схема для розрахунку траєкторії проколу ґрунту

Fig. 2 – Scheme for calculating the trajectory of soil puncture

При цьому відхилення від проектної осі відбуватиметься з вихідної точки до максимального відхилення від траєкторії в точці С. Це слід враховувати при встановленні точки критичного відхилення $H_{\text{від}}$. Подальший рух головки потребує зміни положення скошеної поверхні на 180° доти, поки траєкторія руху головки не досягне проектного напрямку в точці Е. Далі наконечник головки повинен змінити свою скошену форму на конусну і пересуватися далі в прямому напрямку. Якщо відхилення знову сягне свого критичного значення, процес корекції треба повторити знову. З наведеного постають питання: яким може бути критичне відхилення від проектної траєкторії, яке максимальне відхилення лінії може виникнути і на якій відстані може відбутися корекція траєкторії руху? Для відповіді на ці питання треба встановити фактори, що впливають на процеси роботи обладнання та встановити лінію траєкторії проколу ґрунту під час її корекції.

Відображена схема руху головки на рисунку 2 визначається формою наконечника головки, що проколює, а її траєкторія встановлює лінію прогину штовхаючих штанг. Прагнення скоротити величини відхилення та довжини ділянки корекції може привести роботу штанг до безпечної зони корекції, коли вона може зламатися (рис. 3).

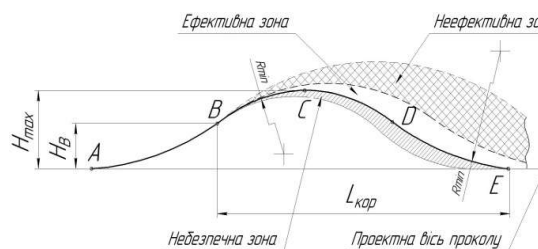


Рис. 3 – Зони ефективності траєкторії проколу ґрунту

Fig. 3 – Soil penetration trajectory efficiency zones

Управління процесом корекції та вибір траєкторії проколу визначається кутом скосу наконечника проколюючої голівки та залежить від типу ґрунту в якому розробляється свердловина. Значення відхилення голівки в залежності від цих факторів були досліджені в роботі [10] і можуть бути представлені у графічному вигляді, наведеному на рисунку 4.

Якщо в процесі проколу головка снаряда в напрямку нормальному до осі проколу ОХ відхилилася на деяку величину, необхідно ввести в дію елемент головки зі скошеною поверхнею так, щоб виникла відхиляюча сила в протилежному напрямку відхилення y_0 (див. рис. 5).

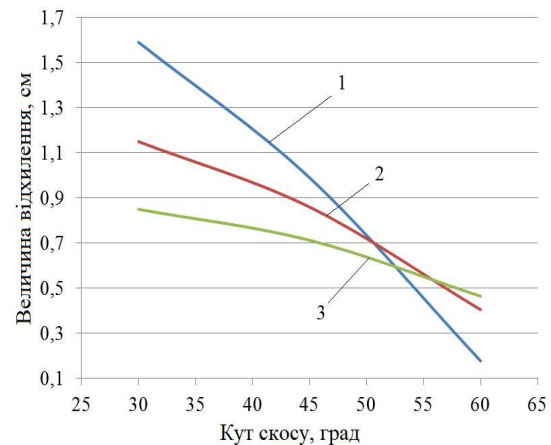


Рис. 4 – Залежність відхилення головки від кута скосу наконечника: 1 - у супіску; 2 - у суглинці; 3 - в глині

Fig. 4 – Dependence of the head deflection on the bevel angle of the tip: 1 - in sandy loam; 2 - in loam; 3 - in clay

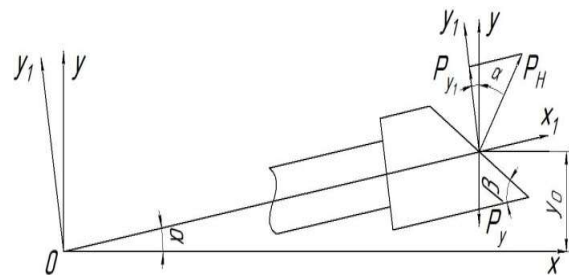


Рис. 5 – Сили на головці, що відхиляється
Fig. 5 – Forces on the deflecting head

Виходячи з другого закону Ньютона та результатів досліджень [11] рівняння руху головки снаряда в напрямку осі ОУ матиме вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = P_y (1-\lambda) \cos \alpha \quad (1)$$

Результати, отримані в роботі [11] дозволяють встановити коефіцієнт λ :

$$\lambda = 1 - \frac{2mL(1-Ktg\beta)}{Pn} \quad (2)$$

де K та n – різні чисельні значення для різних типів ґрунтів:

для супісї: $K=21,3$; $n=0,532$;

для суглинку: $K=33,6$; $n=0,425$;

для глини: $K=46,88$; $n=0,325$.

Підставляючи (2) у (1) диференціальне рівняння набуде вигляду:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{2L(1-Ktg\beta)}{t_1^2 n} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{L}\right)^2} \quad (3)$$

де L і t_1 – довжина однієї секції проколюючого механізму і час проколу відповідно;

β – Кут скосу елемента головки;
 k_i^n – коефіцієнти, що характеризують фізичні властивості ґрунту, що залежать від кута скосу β ;

α – кут між напрямком проколу та віссю штанги з проколюючою головкою;

m – маса головки снаряда;

y_0 – відхилення головки снаряда від напрямку проколу у нормальному напрямку.

У початковий момент часу необхідно знайти рішення диференціального рівняння (3) за початкових умов

$$y|_{t=0} = y_0, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

Крайова задача (3) і (4) є нелінійним завданням, і її рішення може бути отримане за допомогою кінцевих різниць. Отримане рішення y_1 буде величиною, на яку відхилиться головка снаряда у напрямку, протилежному спочатку заданому відхиленню y_0 при проходженні однієї штанги механізму, що проколює.

Для визначення відхилення y_2 під час проходження другої штанги механізму необхідно вирішити рівняння (3) з початковими умовами

$$y|_{t=0} = y_1, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

Цей процес необхідно продовжувати п раз і отримати величину

$$y_0 - y_1 - y^2 - \dots - y_n = \bar{y} \quad (6)$$

Знаючи величину y_0 і $\bar{y}$, а також кількість штанг проколюючого механізму, використаних при цьому, можна визначити траєкторію, радіус якої максимально наближається до допустимої лінії згинання штанги. При ймовірності досягнення граничної величини відхилення $y_0 - \bar{y}$ необхідно проколюючу головку снаряда повернути на 180° навколо осі штанги та продовжити процес проколу

Для розрахунку подальшої траєкторії проколу необхідно вирішувати рівняння (3) із початковими умовами

$$y|_{t=0} = \bar{y}, \quad \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

В результаті обчислень отримаємо значення y_k (див. рис. 6).

Виходячи з результатів, отриманих раніше (див. рис. 3), візьмемо $y|_{t=0} = \frac{y_0}{2}$

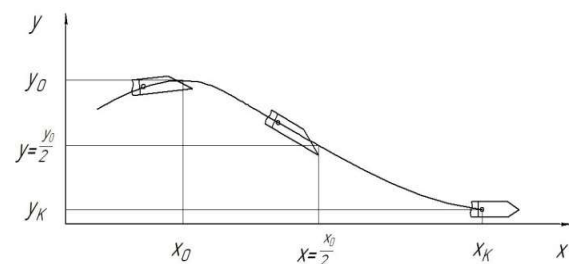


Рис. 6 – Рівняння траєкторією руху головки снаряда

Fig. 6 – Equation of the trajectory of the projectile head

Після повороту головки, що проколює, на 180° при значенні відхилення $y = \frac{y_0}{2}$ (див. рис.6) подальший розрахунок траєкторії руху головки снаряда здійснюється відповідно до рівняння [2] з початковими умовами

$$y|_{t=0} = \frac{y_0}{2}, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (8)$$

Для першої з доданих штанг та для всіх наступних з оновленими початковими умовами. В результаті отримаємо наступну послідовність значень

$$y_k = \frac{y_0}{2} - y_1 - y_2 - \dots - y_n - y_{n+1} - \dots - y_{n+k}. \quad (9)$$

Процес проколу необхідно продовжувати доти, доки величина відхилення y_k від осі проколу буде досить малою.

Враховуючи, що відхилення незначної величини в межах 30-40 мм на ділянці 10 м для корекції процесу з цих умов знадобиться ділянка понад 15-20 м. Таким чином, можна припустити, що при проколі завдовжки до 100 м таких ділянок корекції може виникнути до 3-4 штук. А це означає, що установка проколу повинна мати два приводи руху: подання та обертання. Конструкція наконечника ґрунтопрокоючої головки при цьому повинна в потрібний час змінювати свою форму з конусної на скошену. Кут нахилу площини у цьому положенні повинен відповідати умові створення ефективної лінії траєкторії руху головки, яка залежить від типу ґрунту, що розробляється. Така конструкція установки та робочого обладнання пропонується авторами у патентах [20, 21].

Перевірка теоретичних положень, отриманих у роботі, пов'язаних із впливом кута нахилу скошеного наконечника на величину відхилення траєкторії руху прокоючої головки від проектною осі проводилася за розробленою методикою проведення польових досліджень з експериментальною моделлю установки та робочим органом, представленими на рис. 7.

Результати експериментальних вимірювань величини відхилення головки на дистанції 10 м для різних кутів нахилу лобової поверхні до осі наконечника та їх порівняння з розрахунковими даними представлені у таблиці.

Змінні наконечники та вимір їх величини відхилення на виході в приймальному котловані представлені на рисунку 8.



Рис. 7 – Експериментальна установка для проколу ґрунту

Fig. 7 – Experimental setup for soil puncture



Рис. 8 – Перевірка величини відхилення головки від проектного напрямку:

а – експериментальні наконечники;

б – відхилення головки на виході

Fig. 8 – Checking the magnitude of the head deviation from the design direction:

а – experimental tips;

б – head deviation at the exit

Таблиця 1.
Результати вимірів величин відхилення
Table 1.
Results of measurements of deviation
values

Кут нахилу скосу	Величина відхилення головки, см								
	Супесь			Суглинок			Глина		
	Експеримент	Розрахунок	%	Експеримент	Розрахунок	%	Експеримент	Розрахунок	%
25°	40	35	12	44	39	11	20	18	9
40°	29	26	10	28	25	11	17	15	12
55°	14	11	12	16	18	11	13	11	15
70°	-	-	-	-	-	-	3	2	33

З аналізу наведених у таблиці даних встановлено, що відхилення між теоретичними розрахунками та експериментально отриманими результатами не перевищує

15%, що свідчить про задовільну узгодженість моделі з практичними спостереженнями та підтверджує її придатність для подальшого використання в інженерних розрахунках. Водночас найбільший відсоток розбіжності зафіксовано при значенні кута

70°, що можна пояснити тим, що за таких умов вплив цього кута на процес керування рухом робочої головки в ґрунтовому середовищі практично нівелюється або стає незначним, унаслідок чого знижується точність прогнозування її поведінки.

Висновки

1. Отримані результати можуть бути рекомендовані для практичного застосування при виборі параметрів ґрунтопроколюючої головки і схеми приводу силової установки. Методологія оперативної корекції траєкторії проколу ґрунту має враховувати: фізико-механічні властивості ґрунту, кут нахилу скошеної поверхні наконечника проколюючої головки, податливість та вигин штанг.

2. Для реалізації процесу корекції рекомендовано проколюючу головку робити з адаптованим наконечником, а установку з рухами – подачі та подачі з обертанням.

3. Натурні дослідження з експериментальним зразком установки підтвердили теоретичні припущення про величину відхилення головки, що проколює, в залежності від типу ґрунту в якому розробляється свердловина і від величини кута скосу лобового майданчика наконечника.

4. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що максимальне відхилення досягається при менших кутах нахилу майданчика, а найменша величина відхилення відбувається у глині. Так, при довжині дистанції проколу 10 м для кута нахилу 25 ° в супіску головка відхилиться на 40 мм, а в глині на 20 мм. У той же час при вугіллі 55° відхилення головки в тих же умовах склало 14 і 13 мм відповідно. При куті 70° вплив скосу лобової поверхні наконечника на процес втрачається.

5. За результатами дослідження отримано рівняння руху робочого органу, що проколює, в ґрунті на ділянці корекції траєкторії, яка дає можливість вибрати параметри робочого органу для конкретних ґрунтових умов, за яких буде гарантована раціональна довжина ділянки корекції у разі відхилення головки від напрямку її руху..

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувалась етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

- 1 Наукові основи та практика створення мінімальноенергоємних робочих органів для формування комунікаційних порожнин в ґрунті: монографія / В. М. Супонев, С. В. Кравець, О. П. Посмітюха, С. П. Балесний. Харків : ХНАДУ, 2021. 304 с.
- 2 Tong, H.; Shao, Y. Mechanical Analysis of DS in Horizontal Directional Drilling. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063145>
- 3 Theoretical Analysis of Drilling Fluid Flow for Maxi-Horizontal Directional Drilling / Wang, Z. Y.; Hu, C. M.; Li, L.; Yang, C.; Liang, H. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice.* 2024. iss 15. 04024050. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1608>
- 4 Ehm, G. The changing pipeline industry. *Pipes Pipelines Int.* 2016. iss 20. Pp. 20–22.
- 5 Polak M. A. Analysis of polyethylene pipe behaviour in horizontal directional drilling field tests. *Can. J. Civ. Eng.* 2005. iss 32. Pp. 665–677.
- 6 Determination of Pipe Pullback Loads in Horizontal Directional Drilling Using an Advanced Computational Dynamic Model / Yang C. J.; Zhu W. D.; Zhang W. H.; Zhu X. H.; Ren G. X. *J. Eng. Mech.* 2014. iss 140. 0401406. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000749)
- 7 Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods—A critical review / Cai L. X., Xu G., Polak M. A., Knight M. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2017. iss 69. Pp. 85–93.

- 8 Cheng E., Polak M. A. Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2007. iss 22. Pp. 633–643.
- 9 Technical Expertise Application of Driscopipe in Directional Drilling and River Crossings / Phillips Driscopipe Company. Brownwood, TX, USA, 1993.
- 10 Drillpath T. M. Drillpath Theory and User's Manual. Infracore LLC : Houston, TX, USA, 1996.
- 11 ASTM F 1962-20. Standard Guide for the Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit under Obstacles, Including River Crossings. West Conshohocken, PA, USA, 2020.
- 12 GB 50424-2015. Code for Construction of Oil and Gas Pipeline Crossing Project. CNPC : Beijing, China, 2015.
- 13 Polak, M.A.; Lasheen, A. Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2001, 16, 47–55. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00020-2)
- 14 Huey, D.P.; Hair, J.D.; McLeod, K.B. Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. *In Proceedings of the International No-Dig Conference, New Orleans, LA, USA, 31 March–3 April 1996.*
- 15 Cai, L.; Polak, M.A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 2019, 83, 313–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.014>
- 16 Suponyev V., Kravets S., Balesnyi S., Shevchenko V., Yefymenko A., Ragulin V. Determination of the regularities of the soil punching process by the working body with the asymmetric tip. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. № 2/1(110). С. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230256> .
- 17 Кравець С. П., Супонев В. М., Балесний С. П. Встановлення реакцій ґрунту і величини відхилення від осевого руху при його проколі асиметричним наконечником. Автомобільний транспорт. 2017. Вип. 41. Харків : ХНАДУ. С. 155-163. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.155>
- 18 Rheological Properties of Clay-Based Drilling Fluids and Evaluation of Their Hole-Cleaning Performances in Horizontal Directional Drilling / Deng S., Kang C., Bayat A., Kuru E., Osbak M., Barr K., Trovato C. J. *Pipeline Syst. Eng.* 2020. no. 11. 04020031. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000475)
- 19 Fluidic Drag Estimation in Horizontal Directional Drilling Based on Flow Equations / Faghih A., Yi Y. L., Bayat A., Osbak M. J. *Pipeline Syst. Eng.* 2015. no 6. 04015006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000200)
- 20 Установка для керованого проколу ґрунту : пат. 95501 Україна: МПК E02F 5/18 (2006.01). № 95501; заявл. 10.07.14; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24. С. 6.
- 21 Пілотна ґрунтопроколююча головка для керованого проколу : пат. 12583; заявл. 09.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9.

Отримано: 07.04.2026 / Переглянуто: 11.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**SUPONYEV V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation, Testing, and Service of Construction and Road Machinery

email: v-suponev@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7404-6691>

¹**RAGULIN V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery named after A. M. Kholodov

e-mail: ragulinrvn@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2083-4937>

²**TKHORUK Y.**, PhD (Engineering), Professor Department of

building, road, melioration, agricultural machinery and equipment

e-mail: ie.i.tkhoruk@nuwm.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2448-4268>

²**KRAVETS S.**, DSci (Engineering), Professor Department of

building, road, melioration, agricultural machinery and equipment

e-mail: s.v.kravets@nuwm.edu.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4063-1942>

¹**LEMETS O.**, postgraduate student of the Department of Construction and Road Machinery

email: m1a24loo@stud.khadi.kharkov.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-9736>

¹**KULIKOV M.**, master's student of the Department of Construction and Road Machinery

e-mail: Nikitakulikovgg@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6871-3812>

¹*Kharkiv National Automobile and Highway University*

Yaroslava Mudrogo str. 25, 61002, Kharkiv, Ukraine

²*National University of Water and Environmental Engineering*

Soborna str. 11, 33000, Rivne, Ukraine

EQUATIONS OF THE TRAJECTORY OF THE HEAD'S MOTION IN THE GROUND WITH THE CONDITION OF ITS CORRECTION AND THEIR EXPERIMENTAL VERIFICATION

The primary limitation of the method is the deviation of the tool trajectory from the design path due to various factors, such as soil heterogeneity and positioning inaccuracies. This restricts the application of the method to short distances of up to 15–20 m.

To improve puncture accuracy, trajectory correction of the working body is proposed through adaptation of the tip (head) geometry.

In the event of deviation from the design trajectory, a tip with an asymmetric geometry is employed, generating a controlled imbalance of interaction forces with the soil. This enables purposeful control of the head motion during puncturing, allowing trajectory correction without interrupting the process and without additional intervention in the system.

The conducted research resulted in the development of a mathematical framework, including corresponding equations for trajectory correction of the working body. Key parameters such as soil type, its physical properties, and the inclination angle of the tip were taken into account. The obtained relationships allow prediction of system behavior and provide the capability to improve puncture accuracy under various operating conditions.

Analysis of experimental data showed that the largest trajectory deviations occur at smaller inclination angles of the tip, whereas with increasing angle this effect gradually decreases. In addition, clay soils exhibit the smallest deviations compared to other soil types. In particular, at a distance of 10 m and an inclination angle of 25°, the deviation in sandy loam was about 40 mm, while in clay it was approximately 20 mm. When the angle increases to 55°, these values decrease to 14 mm in sandy loam and 13 mm in clay, respectively. Further increase of the angle to 70° demonstrated that the influence of the inclination angle becomes negligible and no longer significantly affects trajectory deviation. At the same time, the discrepancy between experimental results and theoretical calculations does not exceed 15%, indicating sufficient accuracy of the proposed model and confirming its adequacy under real operating conditions.

The obtained results open new opportunities for improving the accuracy and efficiency of underground utility installation. In particular, they enable an increase in puncture length without loss of process controllability and expand the applicability of the static puncture method in complex engineering-geological conditions, ensuring more reliable and predictable execution of operations.

KEYWORDS: *trenchless technology, static soil puncturing, utility infrastructure, penetrating tool, trajectory correction, drill rod, borehole.*

In cites: Suponyev V., Ragulin V., Tkhoruk Y., Kravets S., Lemets O., Kulikov M. (2026). Equations of the trajectory of the head's motion in the ground with the condition of its correction and their experimental verification. *Engineering*, (37), 153-163. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-13> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication

References

- 1 Suponyev, VM, Kravets, SV, Posmitiukha, OP & Balesnyi, SP 2021, *Naukovi osnovy ta praktyka stvorennia minimalnoenerhoiemnykh robochykh orhaniv dlia formuvannia komunikatsiinykh porozhnyn v grunti* [Scientific Foundations and Practice of Creating Minimally Energy-Consuming Working Bodies for Forming Communication Cavities in Soil], KhNADU, Kharkiv. (in Ukrainian).
- 2 Tong, H.; Shao, Y. (2022) Mechanical Analysis of DS in Horizontal Directional Drilling. *Appl. Sci.* 12, 3145. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12063145>
- 3 Wang, Z.Y.; Hu, C.M.; Li, L.; Yang, C.; Liang, H. (2024) Theoretical Analysis of Drilling Fluid Flow for Maxi-Horizontal Directional Drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 15, 04024050. DOI: <https://doi.org/10.1061/JPSEA2.PSENG-1608>
- 4 Ehm, G. (2016) The changing pipeline industry. *Pipes Pipelines Int.* 20, 20–22.
- 5 Polak, M.A. (2005) Analysis of polyethylene pipe behaviour in horizontal directional drilling field tests. *Can. J. Civ. Eng.* 32, 665–677.
- 6 Yang, C.J.; Zhu, W.D.; Zhang, W.H.; Zhu, X.H.; Ren, G.X. (2014) Determination of Pipe Pullback Loads in Horizontal Directional Drilling Using an Advanced Computational Dynamic Model. *J. Eng. Mech.* 140, 0401406. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000749](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000749)
- 7 Cai, L.X.; Xu, G.; Polak, M.A.; Knight, M. (2017) Horizontal directional drilling pulling forces prediction methods—A critical review. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 69, 85–93.
- 8 Cheng, E.; Polak, M.A. (2007) Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 22, 633–643.
- 9 Phillips Driscopipe Company. (1993) *Technical Expertise Application of Driscopipe in Directional Drilling and River Crossings*; Phillips Driscopipe Company: Brownwood, TX, USA.
- 10 Drillpath, T.M. (1996) *Drillpath Theory and User's Manual*; Infrasoft LLC: Houston, TX, USA.
- 11 *ASTM F 1962-20*; (2020) Standard Guide for the Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit under Obstacles, Including River Crossings. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.
- 12 *GB 50424-2015*; (2015) Code for Construction of Oil and Gas Pipeline Crossing Project. CNPC: Beijing, China.
- 13 Polak, M.A.; Lasheen, A. (2001) Mechanical modelling for pipes in horizontal directional drilling. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 16, 47–55. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00020-2)
- 14 Huey, D.P.; Hair, J.D.; McLeod, K.B. (1996) Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling. *In Proceedings of the International No-Dig Conference, New Orleans, LA, USA, 31 March–3 April 1996.*
- 15 Cai, L.; Polak, M.A. (2019) A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 83, 313–323. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.014>
- 16 Suponyev V., Kravets S., Balesnyi S., Shevchenko V., Yefymenko A., Ragulin V. Determination of the regularities of the soil punching process by the working body with the asymmetric tip. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. № 2/1(110). C. 44-51. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230256> (in Ukraine).
- 17 Kravets S.P., Suponyev V.M., Balesnyi S.P. (2017) Establishing Soil Reactions and the Magnitude of Deviations from Axial Movement During Piercing with an Asymmetric Tip. *Automotive*

Transport. Iss. 41. Kharkiv: KhNADU. P. 155-163. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.155> (in Ukrainian).

18 Deng, S.; Kang, C.; Bayat, A.; Kuru, E.; Osbak, M.; Barr, K.; Trovato, C. Rheological Properties of Clay-Based Drilling Fluids and Evaluation of Their Hole-Cleaning Performances in Horizontal Directional Drilling. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2020, 11, 04020031. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000475](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000475)

19 Faghieh, A.; Yi, Y.L.; Bayat, A.; Osbak, M. Fluidic Drag Estimation in Horizontal Directional Drilling Based on Flow Equations. *J. Pipeline Syst. Eng.* 2015, 6, 04015006. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000200](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000200)

20 Penchuk, VO, Belytsky, DH, Suponyev, VM, Oleksin, VI & Balesnyi, SP 2006, Ustanovka dlia kerovanoho prokolu hruntu [Device for Controlled Soil Piercing], Patent UA 95501. IPC E02F 5/18 (2006.01) (in Ukraine).

21 Penchuk, VO, Suponyev, VM, Balesnyi, SP, Oleksin, VI, Shchukin, OV, Sidorov, VV & Usik, SV 2016, Pilotna hruntoprokoliuiucha holovka dlia kerovanoho prokolu [Pilot Soil-Piercing Head for Controlled Piercing], UA Patent 12583 (in Ukraine).

Submission received: 04.07.2026/Revised: 05.11.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-14>

УДК 621. 87

¹**ФІДРОВСЬКА Н. М.**, Доктор технічних наук, професор,

зав.кафедри будівельних і дорожніх машин

e-mail: nfidrovskaya@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5248-273X>

¹**СМИРНОВ І. П.**, Доктор філософії,

доцент кафедри будівельних і дорожніх машин

e-mail: smirnov_ip@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5982-8123>

¹**ЧЕРНИШЕНКО О. В.**, Доктор філософії,

доцент кафедри будівельних і дорожніх машин

e-mail: chernishen.alex@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3255-1088>

¹**ШТОДА В. С.**,

аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин

e-mail: xapkbob4huh@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8003-5849>

¹**ПОЛЯКОВ О. А.**,

аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин

e-mail: polyakovalx14@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4436-3001>

¹*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В ЛОВОВИНІ КАНАТНОГО БАРАБАНА

Канатні барабани знаходяться в складному напруженому стані, тому що мають три види напружень: стиску, згину і кручення. Основним напруженням являється стиск, який виникає в результаті навивання канату. При визначенні цього напруження барабан розглядається як безкінечна товстостінна труба, яка не має ступиць. При цьому приймають, що натягнення каната постійне по довжині і периметру барабана, тобто приймається рішення Ляме. Але це дуже наближене рішення, яке не відповідає дійсним умовам навантаження барабану.

В статті розглянута задача визначення навантаженого стану лобовини канатного барабану. Всі методи розрахунків лобовин барабанів мають багато недоліків, основні з яких – неврахування змінності навантаження стінки барабану від тиску витків канату, коефіцієнту тертя, геометричних і пружних параметрів канату і барабану.

Лобовина барабану розглянута як кругла пластина, яка навантажена по зовнішньому колу несиметричним тиском. Для рішення поставленої задачі задаємо функцію зовнішнього навантаження лобовини барабану і складаємо рівняння повної потенційної енергії пластини на одиницю довжини вподовж радіуса r без урахування деформації зсуву. При цьому отримуємо диференціальне рівняння 4-го ступеню.

Після рішення цього рівняння отримана залежність для визначення деформації лобовини канатного барабана під дією канату, який намотується на оболонку барабана. Це дасть змогу провести розрахунки завантаженості лобовини і оцінити необхідність посилення її елементами жорсткості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: барабан, лобовина, канат, напруження, деформація, елементи жорсткості.

Як цитувати: Фідровська Н. М., Смирнов І. П., Чернишенко О. В., Штода В. С., Поляков О. А. Визначення напружень в лобовині канатного барабана. Машинобудування. 2026. Вип. 37. С. 164-171. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-14>



Вступ

Багатошарова навивка в підйомній техніці знаходить широке застосування з причин збільшення глибини копалин, а також висоти підйому вантажопідйомники кранами. Все це потребує збільшення довжини канату, який навивається на барабан і в свою чергу збільшення канат канатоємності барабана.

Цим питанням були присвячені роботи таких відомих вітчизняних і іноземних вчених як Б. С. Ковальський, Л. А.

Родионов, И. П. Катасонов, В. И. Дворніков [1], К.С.Заболотний [2,3], Н. М. Фідровська [4-7], І. С. Варченко [8], J. Brodny [9], U. Weiskopf [10].

Але і досі лишається багато питань, які потрібно вирішити для того, щоб багатошарова навивка могла бути використована більш широко. Основні з них – це довговічність підйомного каната, який використовується при багатошаровій навивці, а також напружений стан канатного барабана.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Конструкції і розрахунки шахтних підйомних машин розглянуті В. І. Дворніковим в роботі [1].

В своїх роботах К.С.Заболотний за допомогою МКЕ проводить розрахунки напруженого стану обичайки і лобовин канатних барабанів [2-3].

В роботі [4] було проведено дослідження напруженого стану канатного барабану аналітичним методом і методом математичного моделювання. Застосування подібних методів дозволяє контролювати розрахункову базу деталей машин.

В статті [5] автори провели дослідження динамічних зусиль в канаті, які виникають при багатошаровій навивці на барабан і дуже погіршують напружений стан канатного барабана. На основі розрахунків були збудовані графіки динамічних відхилень перетину канату від положення рівноваги.

В роботі [6] приведені методи визначення напружень в канатному барабані, їх порівняння та доцільність застосування.

В статті [7] розглянуто питання напруженого стану лобовини канатного барабану підйомної машини. Був запропонований уточнений розрахунок лобовини канатного барабану з урахуванням змінності натягнення канату.

В роботі [8] були розглянуті напруження в канатному барабані біля

кілець жорсткості. Було доведено, що напруження у зварному шві перевищує напруження стиску від зовнішнього навантаження, що підтверджує шкідливість установки кілець та ребер жорсткості в канатних барабанах.

В статті [10] автори досліджують багатошарову навивку канату на барабани шахтних підйомних машин.

В роботі [11] розглядався закон впливу різних режимів кріплення канатів на барабані для багатошарової навивки. Також було перевірено коректність теоретичної моделі розрахунку за допомогою програмного забезпечення для аналізу методом кінцевих елементів. Результати показали, що конструкція барабана має більший вплив на синхронізацію канатів при двоканатний багатошаровій навивці.

В роботі [12] для дослідження була вибрана модель барабана з двоканатною багатошаровою навивкою. Авторами розглядалося статичне натягнення каната, для цього проводився модельний аналіз методом кінцевих елементів. Було встановлено, що максимальна деформація барабана переважно зосереджена в середній частині та змінювалась у процесі намотування каната з $7,88 \times 10^{-6}$ м до $1,014 \times 10^{-5}$ м, а максимальна еквівалентна сила впливу на барабан змінювалась з $5,71 \times 10^5$ Па до $7,306 \times 10^5$ Па.

Постановка проблеми

В підручниках і довідниках по вантажопідіймальним кранам наводяться наближені розрахунки барабанів, які використовуються в навчальній і конструкторській практиці. В багатьох випадках вони являються недостатніми.

Недоліком спрощеного розрахунку барабану являється невизначеність в оцінці запасів міцності і можливість більш повного використання матеріалу. Крім того, не враховуючі місцеві напруження, які виникають в місцях установки ребер жорсткості, а також в місцях спряження стінки з лобовиною, спрощений розрахунок

не дає критерію для забезпечення міцності в цих точках.

Розрахунок барабана базується на рішеннях, які отримані для безкінечної товстостінної труби постійного перетину, навантаженої постійним тиском. Наближеність такого розрахунку не підлягає сумніву. Вже давно це стало явним і викликало проведення ряду досліджень, автори яких намагалися уточнити розрахункову схему, навантаження, які діють на барабан при намотуванні канату і у зв'язку з цим розробити розрахунки на міцність і стійкість барабану.

Викладення основного матеріалу

Приймаємо, що лобовина являється круглою пластиною, яка навантажена по зовнішньому колу несиметричним тиском

$$p = F(r, \phi) \quad (1)$$

де r – радіус пластини,
 ϕ – кут, який відраховується від вертикальної діаметральної лінії.

Прогини пластини будуть залежати від координати r і від кута ϕ і їх можна представити у вигляді

$$w(r, \phi) = w \cos n\phi \quad (2)$$

де n – числа натурального ряду.

Кривизна деформованої поверхні пластини в будь-якому діаметральному перерізі буде визначатися

$$\chi_r = -\frac{\partial^2 w(r, \phi)}{\partial r^2} = -\frac{d^2 w}{dr^2} \cos n\phi \quad (3)$$

В коловому напрямку кривизна буде визначатися

$$\chi_\phi = \left(\frac{n^2}{r^2} w - \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) \cos n\phi \quad (4)$$

Кут закручування окремих елементів

$$\chi_{r\phi} = -\frac{\partial^2 w(r, \phi)}{\partial r \partial \phi} = \left(\frac{n}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{1}{r^2} w \right) \sin n\phi \quad (5)$$

Погонні моменти згину в колових перетинах

$$\begin{aligned} m_r &= D(\chi_r + \mu\chi_\phi) = \\ &= -D \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n^2}{r^2} w \right) \right] \cos n\phi \end{aligned} \quad (6)$$

де D – циліндрична жорсткість пластини

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)},$$

E – модуль пружності матеріалу пластини,

μ – коефіцієнт Пуассона.

Погонні моменти згину в діаметральних перетинах

$$\begin{aligned} m_r &= D(\chi_r + \mu\chi_\phi) = \\ &= -D \left[\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \mu \frac{d^2 w}{dr^2} - \frac{n^2}{r^2} w \right] \cos n\phi \end{aligned} \quad (7)$$

Погонні моменти кручення

$$\begin{aligned} m_{r\phi} &= D(1-\mu)\chi_{r\phi} = \\ &= D(1-\mu) \left(\frac{n}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n}{r^2} w \right) \sin n\phi \end{aligned} \quad (8)$$

Рівняння повної потенційної енергії пластини на одиницю довжини впоперек радіуса r без урахування деформації зсуву

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_0^{2\pi} \left[\frac{1}{2} m_r \chi_r + \frac{1}{2} m_\phi \chi_\phi + m_{r\phi} \chi_{r\phi} - \right. \\ &\quad \left. - p_n(\phi) \cos n\phi w(r, \phi) \right] r d\phi \end{aligned} \quad (9)$$

Зовнішнє навантаження лобовини барабану приймаємо за формулою

$$p = \frac{T_0}{R} e^{-kf\phi} \quad (10)$$

де T_0 – натягнення канату, яке сходиться з барабану,

k – коефіцієнт, який враховує пружні і геометричні параметри канату і барабану

$$k = \frac{E_b d}{E_k \sqrt{R_b \delta}} \quad (11)$$

f - коефіцієнт тертя канату і барабану,

φ - кут намотування канату,

R - зовнішній радіус лобовини,

R_b - радіус обичайки барабану,

E_b, E_k - відповідно модуль пружності барабану і канату,

d - діаметр канату,

δ - товщина обичайки.

Підставляючи всі вищевказані формули в рівняння (9) отримаємо

$$\Gamma = \left\{ \begin{aligned} & \frac{D}{2} \left[\frac{d^2 w}{dr^2} + \mu \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n^2}{r^2} w \right) \right] \frac{d^2 w}{dr^2} + \\ & + \frac{D}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n^2}{r^2} w + \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n^2}{r^2} w \right) + \\ & + D(1-\mu) \left(\frac{n}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{n}{r^2} w \right) - \frac{T_0 k \mu e^{-k f \phi}}{R_b (k^2 f^2 + n^2)} \end{aligned} \right\} \pi n$$

Вирішуємо задачу за допомогою рівняння Ейлера варіаційної задачі

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial w} - \frac{d}{dr} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial \left(\frac{dw}{dr} \right)} \right] + \frac{d^2}{dr^2} \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial \left(\frac{d^2 w}{dr^2} \right)} \right] = 0 \quad (12)$$

Отримуємо диференціальне рівняння 4-го ступеню

$$r^4 \frac{d^4 w}{dr^4} + 2r^3 \frac{d^3 w}{dr^3} - (1-2n^2) \frac{d^2 w}{dr^2} + (1+2n^2) \frac{dw}{dr} - \frac{r^4 T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR (k^2 f^2 + n^2)} = 0 \quad (13)$$

Найбільш можлива деформація лобовини канатного барабана при $n = 2$. При цьому рівняння (13) приймає вигляд

$$r^4 \frac{d^4 w}{dr^4} + 2r^3 \frac{d^3 w}{dr^3} - (1-2n^2) \frac{d^2 w}{dr^2} + (1+2n^2) \frac{dw}{dr} + \frac{r^4 T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR (k^2 f^2 + n^2)} = 0$$

Проводимо заміну $\frac{dw}{dr} = y$, тоді замість рівняння (13) отримуємо неоднорідне диференціальне рівняння 3-го ступеню

$$\frac{d^3 y}{dr^3} + \frac{2}{r} \frac{d^2 y}{dr^2} - \frac{1+2n^2}{r^2} \frac{dy}{dr} + \frac{1+2n^2}{r^3} y = - \frac{T_0 (e^{-2\pi k f} - 1) k f}{DR (k^2 f^2 + n^2)} \quad (14)$$

Складаємо характеристичне рівняння

$$k^3 + \frac{2}{r} k^2 - \frac{1+2n^2}{r^2} k + \frac{1+2n^2}{r^3} = 0 \quad (15)$$

Для знаходження коренів застосовуємо рішення Кардано.

Підстановкою $k = x - \frac{2}{3r}$ приводимо до «неповного» вигляду

$$x^3 + px + q = 0,$$

$$\text{де } p = -\frac{4}{3r^2} - \frac{1+2n^2}{r^2},$$

$$q = 2 \left(\frac{2}{3r} \right)^3 + \frac{2(1+2n^2)}{3r^3} + \frac{1+2n^2}{r^3}$$

Корені знаходимо у вигляді

$$x_1 = A + B,$$

$$x_{2,3} = -\frac{A+B}{2} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}.$$

$$\text{де } A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}},$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}},$$

$$Q = \left(\frac{p}{3} \right)^3 + \left(\frac{q}{2} \right)^2$$

Тоді

$$k_1 = A + B - \frac{2}{3r},$$

$$k_{2,3} = -\frac{A+B}{2} - \frac{2}{3r} \pm i \frac{A-B}{2} \sqrt{3}$$

Часткове рішення рівняння (14) буде мати вигляд

$$y_{\text{has}} = \frac{T_0 (e^{-2\pi k f} - 1) k f}{DR (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} \quad (16)$$

Загальне рішення рівняння (14) буде

$$y = C_1 e^{k_1 r} + e^{k_2 r} (C_2 \sin k_3 r + C_3 \cos k_3 r) + \frac{T_0 (e^{-2\pi k f} - 1) k f}{DR (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} \quad (17)$$

де

$$C_3 = \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR \delta b_1 (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} \left[1 - \left(1 - \frac{e^{a_1 R_c}}{e^{a_1 R}} \right) b_2 \right]$$

$$C_2 = \frac{1}{e^{\frac{a_1 R_c}{2}} \sin a_2 R_c - e^{\frac{3a_1 R}{2}} e^{a_1 R_c} \sin a_2 R} [C_3 b_1 +$$

$$+ \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1) (1 - e^{a_1 R_c} e^{-a_1 R})}{DR \delta (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)}] \square$$

$$C_1 = \frac{T_0 k f (e^{-2\pi k f} - 1)}{DR \delta e^{a_1 R} (k^2 f^2 + n^2) (64 - 17n^2 + n^4)} - e^{-\frac{3}{2}R} (C_2 \sin a_2 R + C_3 \cos a_2 R)$$

де

$$b_1 = e^{-\frac{3a_1 R}{2}} e^{a_1 R_c} \cos a_2 R - e^{-\frac{a_1 R_c}{2}} \cos a_2 R_c$$

$$b_2 = \frac{\sin a_2 R + \frac{a_2}{2} \cos a_2 R}{\sin a_2 R_c - e^{-a_1 R} e^{-\frac{a_1 R_c}{2}} \sin a_2 R}$$

Для перевірки наведеного вище рішення нами був проведений розрахунок для наступних параметрів барабана:

- натягнення канату $T_0 = 4000$ Н;
- радіус обичайки барабана $R_0 = 76$ мм;
- радіус лобовини по ободу $R_l = 111$ мм;

- товщина лобовини $\delta = 2$ мм;

- діаметр канату $d = 6.4$ мм.

За результатами розрахунків був побудований графік, який представлений на рисунку 1.

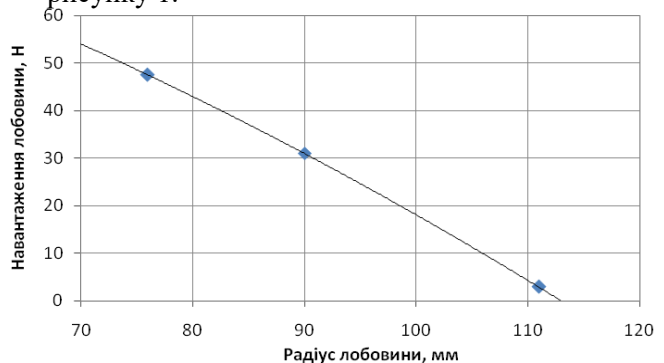


Рис. 1 – Навантаження лобовини канатного барабана

Fig. 1 – Load on the rope drum end face

Висновки

Проведені дослідження дали змогу отримати рішення для визначення деформації лобовини канатного барабана під дією канату, який намотується на оболонку барабана. При цьому в розрахунках було враховано коефіцієнт

тертя, а також коефіцієнт, який враховує жорсткості елементів каната і барабана. Це дасть змогу провести розрахунки завантаженості лобовини і оцінити необхідність посилення її елементами жорсткості.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Шахтний підйом / В. І. Дворніков, В. Р. Бежок, І. Г. Монец, В. А. Пристром. Донецьк : Юго-Восток ; ЛТД, 2007. 645 с.
2. Justification of the algorithm for selecting parameters of composite linings for drums of mine hoisting machines / Zabolotnyi K. S., Panchenko O. V., Kukhar V. Yu., Zhupiiiev O. L., Polushyna M. V., Moskalyova T. V., Antsyferov O. V. *Materials Science and Industrial Machine-Building*. 2023. № 75. Pp. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.148>.
3. Zabolotnyi K., Panchenko O., Zhupiiiev O. Development of the theory of laying a hoisting rope on the drum of a mining hoisting machine. *E3S Web of Conferences, Essays of Mining Science and Practice*. 2019. Vol. 109. Article 00121. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900121>.
4. Фідровська Н. М., Хурсенко С. О., Бобонець О. І. Обґрунтування доцільності встановлення кілець жорсткості в шахтних барабанах. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* : зб. наук. пр. / Харків. нац. автом.-дор. ун-т. Харків : ХНАДУ, 2020. Вип. 88. Т. 2. С. 67-70.

5. Фідровська Н. М., Варченко І. С. Динамічні зусилля в канаті при багат шаровій навивці. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2010. Вип. 2/5 (44). С. 58-61.
6. Фідровська Н. М., Варченко І. С. Визначення напружень в канатному барабані. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2009. Вип. 6/7 (42). С. 62-63.
7. Фідровська Н. М., Лєсовицький К. Ю. Визначення напруженого стану лобовини барабану підйомної машини. *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. Харків, 2017. Вип. 20. С. 19-21.
8. Фідровська Н. М., Варченко І. С., Нєстеренко В. В. Визначення напружень в канатному барабані біля кілець жорсткості. *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. Харків, 2008. Вип. 2. С. 18-21.
9. Brodny J., Żołnierz M. Issue of multiple-layer winding of ropes on drums of mine-shaft hoistings. *Systems Supporting Production Engineering*. 2013. № 5. Pp. 49–62. URL : http://www.dydaktyka.polsl.pl/roz5/konfer/wyd/2013/1/R_5.pdf (last access 07.05.2026).
10. Weiskopf U. Untersuchung zur Lebensdauer von Krauhubseilen in der Mehrlagenwicklung. *Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor – Ingenieurs genehmigte Abhandlung*. 2008. 151 p.
11. Effect of drum structure of double rope multi layer winding hoist on wire ropes' tension difference[J] / Deng Yong, Gong Xiansheng, Tang Tao et al. *Journal of China Coal Society*. 2020. № 45(11). Pp. 3952-3960.
12. Jia Fu. Optimizations of the internal structure of the reel of a double rope winder. *College of MATEC Web of Conferences*. 2023. № 382. 01014. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338201014>.

Отримано: 03.04.2026 / Переглянуто: 08.05.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

¹**FIDROVSKA N. M.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department of Construction and Road Machinery,

e-mail: nfidrovskaya@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5248-273X>

¹**SMIRNOV I. P.**, PhD,

associate professor of the Department of Construction and Road Machinery,

e-mail: smirnov_ip@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5982-8123>

¹**CHERNISHENKO O. V.**, PhD,

associate professor of the Department of Construction and Road Machinery,

e-mail: chernishen.alex@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3255-1088>

¹**SHTODA V. S.**,

graduate student of the Department of Construction and Road Machinery

e-mail: xapbkob4huh@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8003-5849>

¹**POLIAKOV O. A.**,

graduate student of the Department of Construction and Road Machinery

e-mail: polyakovalx14@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4436-3001>

¹*Kharkov National Automobile and Highway University,
Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, 61002, Ukraine.*

DETERMINATION OF TENSIONS IN THE BLOOD OF THE ROPE DRUM

Rope drums are in a complex state of stress because the ropes have three types of stress: compression, bending and torsion. The main stress is the compression that occurs as a result of winding the rope. In determining this stress, the drum is considered as an endless thick-walled tube that has no hubs. At the same time, it is assumed that the tension of the rope is constant along the length and perimeter of the drum, that is, the Lamé decision is accepted. But this is a very approximate solution that does not correspond to the actual load conditions of the drum.

The article deals with the problem of determining the loaded state of the front face of the rope drum. All methods of calculating the front faces of drums have many shortcomings, the main of which is the failure to take into account the variability of the load on the drum wall due to the pressure of the rope turns, the coefficient of friction, the geometric and elastic parameters of the rope and drum.

The front of the drum is considered as a round plate, which is loaded on the outer circle with asymmetric pressure. To solve the given problem, we set the function of the external load of the front face of the drum and compose the equation of the total potential energy of the plate per unit length along the radius r without taking into account the shear deformation. At the same time, we get a differential equation of the 4th degree.

After solving this equation, a dependence was obtained to determine the deformation of the front face of the rope drum under the action of the rope that is wound on the drum shell. This will make it possible to calculate the loading of the frontal lobe and assess the need to strengthen it with stiffening elements.

KEYWORDS: drum, forehead, rope, tension, deformation, stiffness elements.

In cites: Fidrovskaya N. M., Smirnov I. P., Chernishenko O. V., Shtoda V. S., Poliakov O. A. (2026). Determination of tensions in the blood of the rope drum. Engineering, (37), 164-171. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-14> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Dvornikov, VI, Bezhok, VR, Monets, IH & Prystrom, VA 2007, *Shakhtnyi pidiom* [Mine lift], Iuho-Vostok, LTD, Donetsk (in Ukraine).
2. Zabolotnyi, KS, Panchenko, OV, Kukhar, VYu, Zhupiiiev, OL, Polushyna, MV, Moskalyova, TV & Antsyferov, OV 2023, 'Justification of the algorithm for selecting parameters of composite linings for drums of mine hoisting machines', *Materials Science and Industrial Machine-Building*, no 75, Pp. 148–160. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.148>.

3. Zabolotnyi, K, Panchenko, O & Zhupiiiev, O 2019, 'Development of the theory of laying a hoisting rope on the drum of a mining hoisting machine', *E3S Web of Conferences, Essays of Mining Science and Practice*, Vol. 109, Article 00121. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900121> (in Ukraine).
4. Fidrovska, NM, Khursenko, SO & Bobonets, OI 2020, 'Obhruntuvannia dotsilnosti vstanovlennia kilets zhorstkosti v shakhtnykh barabanakh' [Introduction to the installation of hardness kits in shaft drums], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, iss 88, vol. 2, Pp. 67- 70 (in Ukraine).
5. 17. Fidrovska, NM & Varchenko, IS 2010, 'Dynamichni zusyllia v kanati pry bahatosharovii navyvtysi' [Dynamic coupling in the rope at the Bahatoshar Navy], *Skhidno-yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnolohii*, iss 2/5 (44), Pp. 58-61 (in Ukraine).
6. 18. Fidrovska, NM & Varchenko, IS 2009, 'Vyznachennia napruzhen v kanatnomu barabani' [Determination of tension in a rope drum], *Skhidno-yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no 6/7 (42), Pp. 62-63 (in Ukraine).
7. 19. Fidrovska. NM & Liesovytskyi, KIu 2017, 'Vyznachennia napruzhenoho stanu lobovyny barabanu pidiomnoi mashyny' [Determination of the tension state of the front drum of the tractor], *Engineering*, iss 20, Pp. 19-21 (in Ukraine).
8. 20. Fidrovska, NM., Varchenko, IS & Nesterenko, VV 2008, 'Vyznachennia napruzhen v kanatnomu barabani. bilia kilets zhorstkosti' [Determination of tension in a rope drum. white kilets hardness], *Engineering*, iss 2, Pp. 18-21 (in Ukraine).
9. Brodny, J & Żołnierz, M 2013, 'Issue of multiple-layer winding of ropes on drums of mine-shaft hoistings', *Systems Supporting Production Engineering*, no 5, Pp. 49–62 (in Ukraine).
10. Weiskopf, U 2008, 'Unterruchung zur Lebensdauer von Krauhubseilen in der Mehrlagenwicklung', *Von der Fakultat Maschinenbau der Universitat Stuttgart zur Erlangung der Wurde eines Doktor –Ingenieurs genehmigte Abhandlung*.
11. Deng Yong, Gong Xiansheng, Tang Tao et al 2020, 'Effect of drum structure of double rope multi layer winding hoist on wire ropes' tension difference[J]', *Journal of China Coal Society*, no 45(11), Pp. 3952-3960.
12. Jia, Fu 2023, 'Optimizations of the internal structure of the reel of a double rope winder', *College of MATEC Web of Conferences*, no 382, 01014, DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/202338201014>.

Submission received: 04.03.2026/Revised: 05.08.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026

Наукове видання Навчально-наукового інституту "Українська інженерно-педагогічна академія" ХНУ ім. В.Н. Каразіна «Машинобудування» є науковим журналом, який включено до Переліку фахових видань ВАК (Б), де публікуються основні результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата технічних наук.

До публікації приймаються статті, які написані українською або англійською мовами згідно за правилами для авторів і отримали позитивні рекомендації рецензентів.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Електронна версія оформляється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал 1,0, всі поля по 2,5 см. Жирним шрифтом виділяються підзаголовки у статті; курсив допускається лише у виняткових випадках.

Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті. Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці. Усі рисунки підписувати як **Рис. 1** Назва рисунку (розмір 10). Таблиці також оформляти 10 розміром. Слово **Таблиця 1** (жирним, праворуч), на наступному рядку назва таблиці жирним, по центру, розмір 10. **Назви рисунків та таблиць надаються також англійською.**

Орієнтація сторінок книжкова. Вирівнювання по ширині. Абзац 1,0 см.

Для статей необхідно вказати УДК (UDC) (ліворуч, розмір 11), ініціали та прізвище автора (розмір 11, жирним, прописними, по центру), науковий ступінь та звання (розмір 11), на наступному рядку вказати посаду, на наступному вказати e-mail та ORCID ID. на наступному рядку вказати повну назву установи (розмір 11, курсив) та її повна адреса

Назва статті (жирними прописними, по центру, 11 розмір)

Далі подати анотацію (не менше 1800 знаків) та ключові слова (5-6) мовою статті: розмір 10, інтервал 1,0. Для експериментальних статей подати структуроване резюме, де має бути вказані слова: **Мета. Методи. Результати. Висновки.**

Статті друкуються українською та англійською мовами.

Текст експериментальної статті повинен складатися з наступних розділів: «Вступ», «Методика» («Об'єкти та методи дослідження»), «Результати», «Обговорення» (можливий об'єднаний розділ «Результати та обговорення»), «Висновки», «Список використаної літератури».

Розділ «Вступ» повинен містити постановку проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; короткий аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато рішення даної проблеми, виділення конкретних не вирішених питань, яким присвячена стаття, формулювання мети роботи.

Розділ «Методика» повинен містити відомості про об'єкт (об'єкти) дослідження, умови експериментів, аналітичні методи, прилади та реактиви.

У розділі «Результати досліджень» надаються отримані результати та повинно відображувати закономірності, які витікають з отриманих даних. Отриману інформацію необхідно порівняти з наявними літературними даними та показати її новизну.

У розділі «Висновки» надається узагальнення та інтерпретація результатів, аналіз причинно-наслідкових зв'язків між виявленими ефектами, і повинно завершуватись відповіддю на питання, яке поставлено у вступі.

Посилання на джерела у тексті подаються у прямокутних дужках з вказуванням номера за порядком посилання.

Список використаної літератури обов'язково оформляється за ДСТУ 8302:2015, до 60% мають бути в джерела, що опубліковані за останні 5 років, **URL** де є (розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0). Кількість посилань має бути не менше 15.

Через 2 інтервали також подати прізвище, науковий ступінь та наукове звання, посаду, e-mail та ORCID ID, організацію, її повну адресу, назву статті, розширену анотацію та ключові слова англійською (не менше 1800 знаків, розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0). Анотація повинна бути побудована як реферат у реферативних журналах та відражати суть експериментів, основні результати та їх інтерпретацію. Для експериментальних статей подати структуровані резюме де має бути вказані слова: **Purpose. Methods. Result. Conclusion.**; та ключові слова (5-6).

Бібліографічний опис джерел англійською мовою (References) оформлюється відповідно до норм Гарвардського стилю (Harvard Referencing Style). Обов'язково вказувати DOI або Retrieved from .

Адреса редакційної колегії: майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна

Тел. (057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua, сайт: <https://periodicals.karazin.ua/engineering>

Наукове видання

МАШИНОБУДУВАННЯ

Випуск 37

Українською та англійською мовами

Макетування та комп'ютерне верстання
Головченко Богдан

Підписано до друку 25.05.2026. Формат 60х84/8.
Ум. др. арк. 8,42, Обл.-вид. арк.. 10,53
Наклад 50 пр. Зам. №9/26

61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Видавництво

Надруковано Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009