ISSN 2079-1747 (print)

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

МАШИНОБУДУВАННЯ

Випуск 36

ENGINEERING

Issues 36

Харків
Kharkiv
2025

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 32 від 22.12.2025 р.)

Редакційна колегія:
Купріянов О. В., д.техн.н., проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (головний редактор);
Фідровська Н. М., д.техн.н., проф., Харківський національний автодорожний університет (заст. головн. редактора);
Грінченко Г. С., к.техн.н., доц., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна (відповід. редактор);
Васілевський О. М., д.техн.н., проф., Техаський університет в Остіні, США;
Воронцов Б. С., д.техн.н., проф., Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»;
Дашич Предраг, доктор наук, проф., Сербська інженерна академія, Сербія;
Дишев Димитар, доктор наук, проф., Технічний університет Габрово, Болгарія;
Дядюра К. О., д.техн.н., проф., Національний університет «Одеська політехніка»;
Дьяков Димитар, Ph.D., проф., Софійський технічний університет, Болгарія;
Едл Мілан, Ph.D., декан, Університет Західної Богемії, Чеська Республіка;
Каганова Дагмар, Ph.D., декан, Інститут промислової інженерії та менеджменту закордонних справ, Словаччина;
Кириченко І. Г., д.техн.н., проф., Харківський національний автодорожний університет;
Ларшин В. П., д.техн.н., проф., Національний університет «Одеська політехніка»;
Ловейкін В. С., д.техн.н., проф., Національний університет біоресурсів і природокористування України;
Новіков Ф. В., д.техн.н., проф., Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;
Поліщук О. С., д.техн.н., проф., Хмельницький національний університет;
Рябчиков М. Л., д.техн.н., проф., Луцький національний технічний університет;
Ступницький В. В., д.техн.н., проф., Національний університет «Львівська політехніка»;
Супонев В. М., д.техн.н., проф., Харківський національний автодорожний університет;
Тріщ Р. М., д.техн.н., проф., Національний авіаційний університет «ХАІ»;
Уйсал Алпер, Ph.D., проф., Технічний університет Йилдиз, Туреччина;
Фєдін С. С., д.техн.н., проф., Національний транспортний університет;
Хавін Г. Л., д.техн.н., проф., Національний технічний університет «ХПІ»;
Хорошилов О. М., д.техн.н., проф., Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна;
Яковлев М. Ю., д.техн.н., проф., Науково-дослідницький центр Національної гвардії України.

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: R30-02388 (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, 2025

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 32, dated December 22, 2025)

The Editorial Board:
Editor-in-Chief: **Kupriyanov O. V.,** D.Sc., Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Deputy Editor: Fidrovska N. M., D.Sc., Prof., Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;
Executive Editor: **Hrinchenko H. S.,** Ph.D., Assoc. Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Caganova Dagmar, Ph.D., Assoc. Prof., Foreign Affairs Institute of Industrial Engineering and Management, Slovakia;
Dasic Predrag, D.Sc., Prof., Engineering Academy of Serbia, Serbia;
Diakov Dimitar, Ph.D., **Prof., Technical University of Sofia, Bulgaria;**
Dichev Dimitar, D.Sc., Prof., Technical University of Gabrovo, Bulgaria;
Dyadyura K. O., D.Sc., Prof., Odessa Polytechnic National University, Ukraine;
Edl Milan, Ph.D., Assoc. Prof., University of West Bohemia, Czech Republic;
Fedin S. S., D.Sc., Prof., National Transport University, Ukraine;
Khavin G. L., D.Sc., Prof., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine;
Khoroshylov O.M., D.Sc., Prof., V. N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine;
Kyrychenko I., D.Sc., Prof., Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;
Larshin V. P., D.Sc., Prof., Odessa Polytechnic National University, Ukraine;
Loveikin V. S. D.Sc., Prof., National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Ukraine;
Novikov F. V., D.Sc., Prof., Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Ukraine;
Polishchuk O. S., D.Sc., Prof., Khmelnytskyi National University, Ukraine;
Riabchykov M. L., D.Sc., Prof., Lutsk National Technical University, Ukraine;
Stupnytskyy V. V., D.Sc., Prof., Lviv Polytechnic National University, Ukraine;
Suponyev V. M., D.Sc., Prof., Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine;
Trishch R. M., D.Sc., Prof., National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine;
Uysal Alper, Ph.D., Prof., Yildiz Technical University, Turkey;
Vasilevskyi O. M., D.Sc., Prof., The University of Texas at Austin, US;
Vorontsov B. S., D.Sc., Prof., National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine;
Yakovlev M. Yu., D.Sc., Prof., National Academy of the National Guard of Ukraine, 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: R30-02388 (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, 2025

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

Артюх С. М., Артюх А. В.
Оцінка впливу вібраційного навантаження на операторів фрезерувальних верстатів у виробничих умовах **6**

МАТЕРІАЛОЗНАВСВО

Новіков Ф. В.
Діагностика та умови підвищення ефективності процесу шліфування на основі енергетичних параметрів **14**

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Бірюков С. В., Губський С. О.
Аналіз конструкції вітчизняних візків вагонів метрополітену в контексті сучасних тенденцій розвитку вагонобудування **26**

Супонєв В.М., Рагулін В.М., Розенфельд М.В., Наволоков В.В., Лемець О.О.
Екологічна безпека безтраншейних технологій **38**

МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Фурсова Т. М.
Роль інтегральних критеріїв якості в оцінці систем автоматичного регулювання складних енергетичних комплексів **51**

Дрозд В. А., Крамаренко Ю. О.
Підвищення показників якості потужних насосів електростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування **60**

Мезеря А. Ю., Придворов С. С.
Підвищення показників якості малих ГЕС шляхом оптимізації систем керування **70**

Канюк Г. І., Чирочкін Д.О.
Аналіз нормативної бази забезпечення високих показників якості роботи насосів глибинних насосних станцій **81**

Мезеря А. Ю., Насиров С. В.
Аналіз нормативної бази забезпечення високих показників якості роботи газоперекачувальних станцій **92**

Лисенко А. Я., Нос Р. С., Мазорчук К. І., Негодов С. С.
Удосконалення кваліметричних підходів до оцінювання ризиків енергопідприємств з урахуванням аспектів кібербезпеки **102**

Овчаров О. О., Котелевець К. А.
Удосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання АЕС **119**

CONTENTS

APPLIED MECHANICS

Artiukh S., Artiukh A.
Assessment of the impact of vibration load on milling machine operators in production conditions **6**

MATERIALS SCIENCE

Novikov F.V.
Diagnostics and conditions for increasing the efficiency of the grinding process based on energy parameters **14**

INDUSTRIAL ENGINEERING

Biriukov S., Hubskyi S.
Analysis of the design of domestic underground carriage bogies in the context of modern trends in the development of carriage building **26**

Suponyev V., Ragulin V., Rozenfeld M., Navolokov V., Lemets O.
Environmental safety of trenchless technologies **38**

METROLOGY AND INFORMATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES

Fursova T.M.
The role of integral quality criteria in the assessment of automatic control systems for complex energy facilities **51**

Drozd V., Kramarenko Y.
Improving the quality performance of high-power electric power plant pumps through optimization of automatic control systems **60**

Mezerya A., Pridvorov S.
Improving the performance indicators of small hydropower plants through optimization of control systems **70**

Kanjuk G., Chirochkin D.
Analysis of the regulatory base for ensuring high performance quality indicators of pumps of deep pumping stations **81**

Mezerya A., Nasirov S.
Analysis of the regulatory base for ensuring high indicators of the work quality of gas pumping stations **92**

Lysenko A., Nos R., Mazorchuk K., Nehodov S.
Improving qualimetric approaches to risk assessment of energy companies taking into account cybersecurity aspects **102**

Ovcharov O., Kotelevets K.
Improvement of regulatory approaches to technical diagnostics of NPP power equipment **119**

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-01
УДК 621.923

[1]**С. М. АРТЮХ,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: artyhsn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0804-6313
[1]**А. В. АРТЮХ,**
асистент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: nartyh17@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0396-0934
[1]*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОПЕРАТОРІВ ФРЕЗЕРУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ У ВИРОБНИЧИХ УМОВАХ.

У статті представлено результати дослідження впливу вібраційного навантаження на операторів фрезерувальних верстатів у реальних виробничих умовах. Актуальність теми зумовлена зростанням техногенного навантаження на працівників машинобудівних та металообробних підприємств, де інтенсивне використання фрезерного обладнання супроводжується впливом шкідливих фізичних факторів, зокрема локальної та загальної вібрації.

Метою дослідження є кількісна оцінка рівнів вібраційного навантаження та аналіз його впливу на функціональний стан організму працівників. У роботі використано інструментальні методи вимірювання вібрації згідно з ДСТУ ISO 5349, а також анкетування операторів і оцінку скарг на вібраційний дискомфорт. Для забезпечення об'єктивного дослідження впливу вібраційного навантаження на організм працівників фрезерувальних верстатів було проведено серію інструментальних вимірювань параметрів локальної вібрації на робочих місцях. Вимірювання здійснювалися із застосуванням триосевого віброметра у контрольних точках контакту рук оператора з елементами обладнання. Оцінку здійснено за показником вібраційного прискорення, нормованого за середньоквадратичним значенням.

Результати дослідження показали перевищення допустимих рівнів локальної вібрації у ряді робочих точок, що може сприяти розвитку вібраційної хвороби та зниженню працездатності. Запропоновано низку профілактичних заходів, включно з технічними модифікаціями обладнання, регламентованими режимами праці та впровадженням засобів індивідуального захисту.

Отримані дані можуть бути використані для оптимізації умов праці, розробки програм виробничого контролю та системи управління професійними ризиками на промислових підприємствах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: верстат, вібрація, фрезерне обладнання, вібраційне навантаження, умови праці.

Як цитувати: Артюх С. М., Артюх А. В. (2025). Оцінка впливу вібраційного навантаження на операторів фрезерувальних верстатів у виробничих умовах. Машнобудування. 2025. Вип. 36 С. 6-13. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-01

Вступ

У сучасних умовах розвитку машинобудівної та металообробної галузей питання забезпечення безпечних умов праці на виробництві набуває особливої актуальності. Одним із поширених шкідливих факторів на робочих місцях операторів верстатного обладнання, зокрема фрезерувальних верстатів, є вібраційне навантаження. Вібрація, що передається через руки та тіло працівника під час тривалого контакту з обладнанням, може призводити до розвитку вібраційної хвороби, зниження працездатності, порушення функцій опорно-рухового апарату, нервової та серцево-судинної систем, що становить серйозну загрозу для здоров'я людини.

Науково обґрунтована оцінка рівнів вібраційного навантаження у виробничих умовах є необхідною умовою для виявлення потенційних ризиків та розробки ефективних профілактичних заходів. При цьому важливо не лише здійснити кількісні вимірювання, але й проаналізувати функціональний стан організму працівників, які постійно зазнають дії вібрації.

© Артюх С. М., Артюх А. В. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Згідно з даними досліджень [5,8], тривала дія локальної вібрації понад нормативні межі призводить до стійких порушень периферичного кровообігу, зниження чутливості та зменшення тонусу м'язів кистей рук. Праці авторів [6,9] свідчать про наявність чіткої залежності між інтенсивністю вібраційного навантаження та швидкістю розвитку патологічних змін. Водночас, у низці робіт [7] акцентується увага на недостатності сучасної нормативної бази щодо комплексної оцінки вібраційних факторів саме на верстатних дільницях.

Незважаючи на наявні дослідження, проблема залишається відкритою, особливо в контексті вітчизняного виробництва, де питання системного контролю за вібраційним навантаженням часто не отримує належної уваги. Таким чином, актуальним є подальше вивчення параметрів вібрації у реальних умовах експлуатації обладнання та їхнього впливу на працівників, що й стало предметом цього дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до «Гігієнічної класифікації умов праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», умови праці - сукупність факторів виробничого середовища та трудового процесу, які впливають на здоров'я та працездатність людини в процесі її професійної діяльності.

Аналіз факторів, які призводять до професійних захворювань фрезерувальників свідчить, що найбільшу небезпеку становлять фізичні фактори (вібрація і шум) – 32%; забруднення повітря пилом та іншими шкідливостями – 22%; застаріле не ергономічне обладнання – 11,2% [1]. Отже дія вібрації на фрезерувальника є домінуючою чинником, і з часом призводить до виникнення професійного захворювання – вібраційної хвороби.

У відповідності з діючими санітарними нормами оцінка вібрації проводиться наступними методами: частотним (спектральним) аналізом нормованих параметрів; інтегральної оцінкою за частотою нормованих параметрів; дозовою оцінкою.

Відомим і широко застосовуваним способом дозової оцінки локальної вібрації (локальної вібраційної дії на руки) є оцінка еквівалентного рівня вібраційного прискорення за восьмигодинну зміну, відповідно до міжнародних та національних стандартів [2,3].

Його розраховують у трьох ортогональних осях (x, y, z), застосовуючи частотні фільтри згідно з ДСТУ ISO 5349, після чого обчислюється векторна сукупність.

Даний спосіб дозової оцінки локальної вібрації [2] – прогресивний методичний підхід, що дозволяє оцінити реальне навантаження на організм від вібруючого обладнання та прискорюють розвиток вібраційної хвороби супутніх чинників за формулою:

$$А = ДВ + Б,$$

де ДВ - відносна доза вібрації, рази;

Б - сума балів несприятливого впливу на організм людини прискорюють розвиток вібраційної хвороби супутніх чинників.

Причому, чим більше величина зазначених супутніх факторів, тим інтенсивніше їх несприятливий вплив на організм, яке виражається в балах.

Загальна вібрація передається працівнику через опорні поверхні тіла. Локальна вібрація передається через руки працюючих при контакті з ручним механізованим інструментом, органами керування машинами і обладнанням, деталями, які обробляються та ін. До обладнання, що вібрує, відносять обладнання, під час роботи з яким виникає вібрація, рівень якої становить не менше 20% від гігієнічного нормативу. З метою поліпшення умов праці і підвищення ефективності профілактики несприятливого впливу вібрації на тих, що працюють з вібруючим устаткуванням, розроблено положення про режим праці працівників вібронебезпечних професій. Вихідними даними для розробки режиму праці є результати гігієнічної характеристики та оцінки умов праці осіб вібронебезпечних професій, що проводиться відповідно до [4]. Отже, при знайомстві з санітарно-гігієнічної характеристикою умов праці робітників вібронебезпечних професій необхідно детальне з'ясування форми, характеру і часу впливу вібрації.

Постановка проблеми

Виробнича вібрація, яка виникає під час роботи фрезерувальних верстатів, належить до шкідливих фізичних чинників, здатних викликати несприятливі зміни в організмі працівників. Особливу небезпеку становить локальна вібрація, що передається через руки під час утримання інструменту або керування верстатом, спричиняючи розвиток так званого вібраційного синдрому, функціональні порушення в опорно-руховій, серцево-судинній та нервовій системах.

Попри наявність нормативної бази з оцінки вібраційного навантаження, на практиці спостерігається недостатній рівень контролю за параметрами вібрації у реальних умовах роботи. Більше того, багато підприємств не здійснюють систематичні вимірювання вібраційних факторів, що унеможливлює об'єктивну оцінку професійних ризиків. Водночас, більшість досліджень зосереджуються на загальній вібрації, нехтуючи впливом локальної, яка є критичною саме для операторів фрезерувальних верстатів.

Тобто, актуальною науковою та практичною проблемою є виявлення рівня вібраційного навантаження на робочих місцях операторів фрезерного обладнання та оцінка його впливу на функціональний стан організму працівників з метою обґрунтування ефективних заходів профілактики та зниження професійного ризику.

Метою роботи є оцінка інтенсивності вібраційного навантаження на робочих місцях операторів фрезерувальних верстатів, а також аналіз його впливу на функціональний стан організму працівників.

Виклад основного матеріалу

Верстатне обладнання та верстатні комплекси, призначені для механічної обробки різанням, є основним видом технологічних машин для розмірної обробки деталей, у тому числі й у деревообробній та меблевій промисловості.

Для отримання високої чистоти оброблюваних заготовок застосовуються високі швидкості різання (30-50 м/с), що досягаються високими частотами обертання шпинделів. В якості фрезерувальних верстатів для дослідження використовувались два верстати: копіювально-фрезерувальний верстат Induma TM-4C14 (рис. 1, ліворуч) та консольнофрезерувальний верстат 6P82 (рис. 1, праворуч).

За результатами досліджень рівнів локальної вібрації, що діє на працівників фрезерувальних верстатів, побудовано віброграми, приведені на рисунках 2 і 3.

Проведені дослідження виявили перевищення значень локальної вібрації на частотах 8, 16 та 31,5 октавних смуг, тоді як на високих частотах по всім трьом осям рівень вібрації був в межах норми і значно не відхилявся від нормованих значень. Найбільше перевищення визначено для верстату Induma TM-4C14.

Рис 1 – Фрезерувальні верстати: Induma TM-4C14 (ліворуч) та 6P82 -(праворуч)

Вимірювання локальної вібрації виконувалося за допомогою віброметру АТТ-2209 (таблиця 1). Норми вібрації регламентуються згідно з ДБН 3.3.6.039-99 «Державні санітарні норми виробничої загальної і локальної вібрації».

Fig. 1 – Milling machines: Induma TM-4S14 (left) and 6P82 -(right). Measurement of local vibration was performed using the ATT-2209 vibrometer (table 1). Vibration standards are regulated in accordance with DBN 3.3.6.039-99 "State sanitary standards for general and local industrial vibration".

Таблиця 1

Рівні вібрації під час виконання фрезерувальних робіт за даними випробувань у напрямках трьох координатних осей X, Y, Z

Table 1

Vibration levels during milling operations according to test data in the directions of the three coordinate axes X, Y, Z

Джерело вібрації – верстат (Vibration source – machine tool)	Вісь (Axis)	Значення за даними випробувань у напрямку координатних осей на частотах октавних смуг, Гц (Values according to test data in the direction of the coordinate axes at octave band frequencies, Hz)								Одиниця Вимірювання (Unit of measurement)
		8	16	31,5	63	125	250	500	1000	
Induma ТМ-4С14	X	87	85	82	87	92	93	97	93	дБ
	Y	86	84	85	87	92	97	99	99	дБ
	Z	82	84	86	88	94	97	99	95	дБ
6Р82	X	72	74	77	86	89	99	104	107	дБ
	Y	71	75	84	86	85	94	102	99	дБ
	Z	75	73	79	85	91	97	103	109	дБ
ГДР (MPL)		73	73	79	85	91	97	103	109	дБ

**Примітка: ГДР – Гранично допустимий рівень згідно з ДСН 3.3.6.039-99*

**Note: MPL – Maximum permissible level according to SDS 3.3.6.039-99*

Дослідження підтвердили той факт, що працівники, які працюють з вібронебезпечним інструментом мають ймовірність здобути професійне захворювання – вібраційну хворобу, якщо рівні вібрації на робочих місцях будуть вищі за ГДР.

Профілактичні заходи щодо захисту від вібрацій полягають у зменшенні їх у джерелі виникнення та на шляху поширення, а також у застосуванні індивідуальних засобів захисту, проведення санітарних та організаційних заходів. Якщо вібрація машини перевищує допустиме значення, то час контакту працюючого з цією машиною обмежують.

Тривалість роботи з вібруючим інструментом не повинна перевищувати 2/3 робочої зміни.

Гігієнічні нормативи поки залишаються основним інструментом оцінки безпеки для здоров'я працівників і перевищення їх розглядається як порушення санітарного законодавства. Заходи щодо захисту працівника на сьогоднішній день – це скорочений робочий день, тиждень, додаткові дні до відпустки, достроковий вихід на пенсію, доплати за шкідливі умови праці, надання профілактичного харчування, страховка й ін. Однак, вплив небезпечним та шкідливих факторів може викликати порушення здоров'я працівників [6].

Нажаль на сьогоднішній день покращити гігієнічні умови праці повністю неможливо, тому що підприємства фінансово неспроможні власними силами замінити повність старе устаткування на більш сучасне, яке буде менше шкодити працівникові та відповідати гігієнічним нормативам [7].

На основі вищезазначеного виділяють рекомендації для покращення гігієнічних характеристик на робочих місцях працівників вібронебезпечних професій, що полягають в наступному:

- поступова заміна старого устаткування на сучасне;
- регулярні вимірювання параметрів вібрації на робочих місцях;
- розробка системи профілактичних заходів вібраційної хвороби [8].

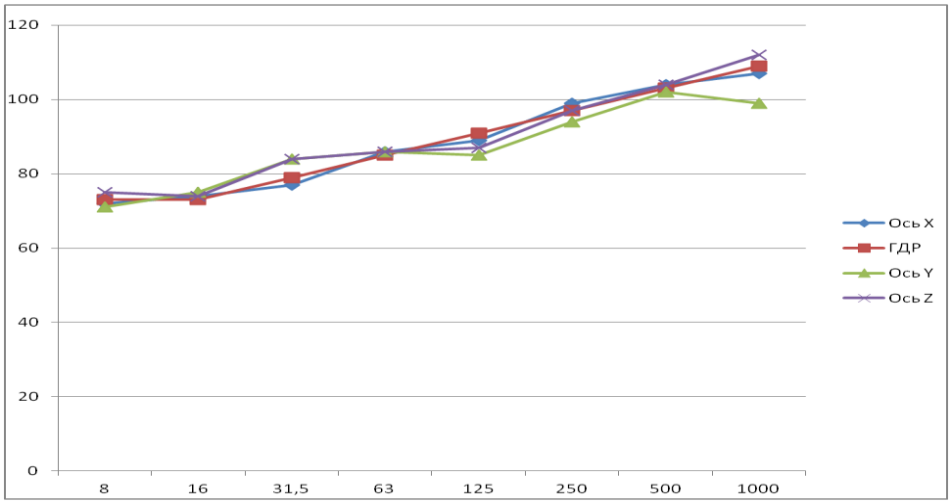

Рис. 2 – Віброграма значень ЛВ для фрезерувального верстату Induma TM-4C14
Fig. 2 – Vibrogram of LV values for the Induma TM-4S14 milling machine

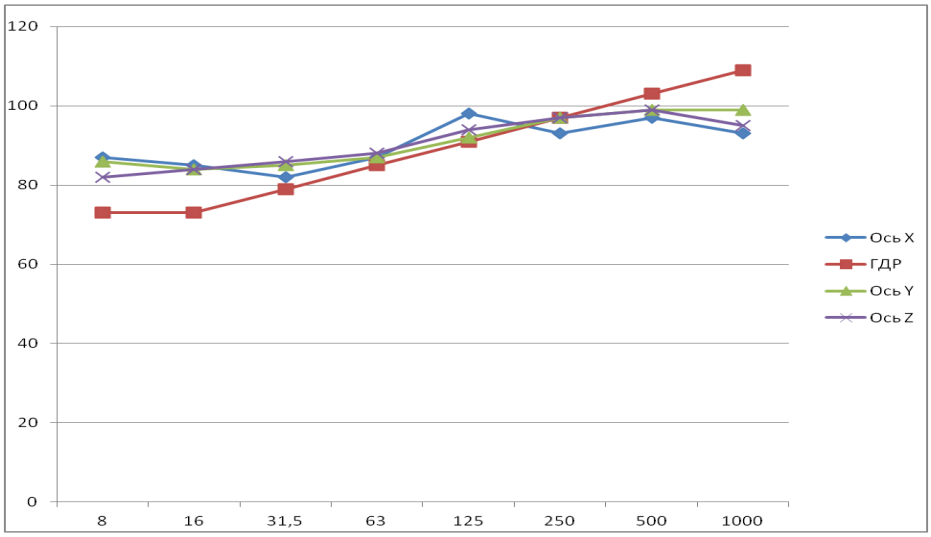

Рис. 3 – Віброграма значень ЛВ для фрезерувального верстату 6Р82
Fig. 3 – Vibrogram of LV values for the 6P82 milling machine

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що оператори фрезерувальних верстатів у виробничих умовах піддаються тривалому впливу локальної вібрації, рівень якої у низці випадків перевищує гранично допустимі значення, визначені чинними нормативами. Інструментальні вимірювання засвідчили, що середньоквадратичне

прискорення вібрації в робочих точках контакту перевищує 5 м/с², що класифікується як високий рівень вібраційного навантаження. Отримані результати підтверджують необхідність удосконалення системи контролю за вібраційними факторами на робочих місцях, впровадження технічних і організаційних заходів щодо зниження впливу вібрації, а також регулярного моніторингу стану операторів. Запропоновані підходи можуть бути використані при розробці заходів професійної гігієни та систем управління.

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. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» : наказ М-ва охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text (дата звернення 22.09 2025)

2. ДСТУ EN ISO 5349-1:2005. Вібрація механічна. Вимірювання та оцінювання впливу на людину локальної вібрації. Частина 1. Загальні вимоги. – [Чинний від 2006 -10-01]. – Київ, 2005. – 34 с. – (Інформація і документація)

3. ДСТУ EN ISO 5349-2:2005. Вібрація механічна. Вимірювання та оцінювання впливу на людину локальної вібрації. Частина 2. Практична настанова з вимірювання на робочому місці. – [Чинний від 2006 -10-01]. – Київ, 2005. – 38 с. – (Інформація і документація)

4. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. – [Чинний від 1999 -12-01]. – Київ, 1999. – 42с. – (Інформація і документація)

5. Іванов І. О. Вплив локальної вібрації на функціональний стан працівників машинобудівного виробництва / І. О. Іванов // Охорона праці і промислова безпека. – 2019. – № 3. – С. 22–28

6. Сидоренко Л. М. Гігієнічна оцінка вібраційного навантаження у металообробних цехах / Л. М. Сидоренко // Гігієна праці. – 2020. – № 2(58). – С. 34–39.

7. Коваленко О. В. Особливості вимірювання вібраційного навантаження на верстатному обладнанні / О. В. Коваленко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2021. – № 5. – С. 44–50.

8. Petrov V. Analysis of vibration exposure and hand-arm risks in metal processing industries / Petrov V., Ivanchenko D., Marchenko S. // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2021. – Vol. 84. – P. 103-167.

9. Zhang Y. Hand-transmitted vibration and operator performance: A systematic review of health effects and exposure levels / Zhang Y., Wang L. // Journal of Occupational Health. – 2022. – Vol. 64. – P. 23-45.

Отримано: 14.08.2025 Прийнято: 22.09.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]**ARTIUKH S.,** Candidate of Technical Sciences;
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: artyhsn@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0804-6313
[1]**ARTIUKH A.,**
Assistant Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: nartyh17@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0396-0934
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF VIBRATION LOAD ON MILLING MACHINE OPERATORS IN PRODUCTION CONDITIONS

The article presents the results of a study of the impact of vibration load on milling machine operators in real production conditions. The relevance of the topic is due to the growing technogenic load on employees of machine-building and metalworking enterprises, where the intensive use of milling equipment is accompanied by the impact of harmful physical factors, in particular local and general vibration.

The aim of the study is to quantify the levels of vibration load and analyse its impact on the functional state of the workers' body. The study used instrumental methods of vibration measurement in accordance with DSTU ISO 5349, as well as a questionnaire survey of operators and an assessment of complaints about vibration discomfort. To ensure an objective study of the impact of vibration load on the body of milling machine operators, a series of instrumental measurements of local vibration parameters at workplaces was carried out. The measurements were carried out using a three-axis vibrometer at the control points of contact between the operator's hands and the equipment elements. The assessment was based on the vibration acceleration normalised by the root mean square value.

The results of the study showed an excess of permissible levels of local vibration at a number of work points, which can contribute to the development of vibration sickness and a decrease in performance. A number of preventive measures have been proposed, including technical modifications of equipment, regulated working conditions and the introduction of personal protective equipment.

The data obtained can be used to optimise working conditions, develop production control programmes and occupational risk management systems at industrial enterprises.

KEYWORDS: machine, vibration, milling equipment, vibration load, working conditions.

In cites: Artiukh S., Artiukh A. (2025). Assessment of the impact of vibration load on milling machine operators in production conditions. Engineering, (36), 6-13. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-01 (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. Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy 2014, ‘Pro zatverdzhennya Derzhavnih sanItarnih norm ta pravil «GIgIEnIchna klasifIkatsIya pratsI za pokaznikami shkIdlivostI ta nebezpechnostI faktorIv virobnichogo seredovischa, vazhkostI ta napruzhenostI trudovogo protsesu» : nakaz MOZ Ukrainy vId 08.04. 2014 № 248’ [On approval of the State Sanitary Norms and Rules "HYGIENIC Classification of Labor by Indicators of Harmfulness and Danger of Factors of the Production Environment, Difficulty and Intensity of the Labor Process"], viewed https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text (Accessed: 22 September 2025)
2. DSTU EN ISO 5349-1:2005 VIbratsIya mehanIchna. VimIryuvannya ta otsInyuvannya vplivu na lyudinu lokalnoYi vIbratsIYi. Chastina 1. ZagalnI vimogi. [Chinniy vId 2006 -10-01] [Mechanical vibration. Measurement and evaluation of human exposure to local vibrations. Part 1. General requirements], Kyiv. (in Ukraine)
3. DSTU EN ISO 5349-2:2005 VIbratsIya mehanIchna. VimIryuvannya ta otsInyuvannya vplivu na lyudinu lokalnoYi vIbratsIYi. Chastina 2. Praktichna nastanova z vimIryuvannya na robochomu

mIstsI. [Chinniy vId 2006 -10-01], [Mechanical vibration. Measurement and assessment of human exposure to local vibrations. Part 2. Practical guide to workplace measurements.], Kyiv (in Ukraine)
4. DSN 3.3.6.039-99 DerzhavnI sanItarnI normi virobnichoYi zagalnoYi ta lokalnoYi vIbratsIYi. [Chinniy vId 1999 -12-01], [State sanitary standards for production of general and local samples], Kyiv. (in Ukraine)
5. Ivanov, IO 2019, 'Vplyv lokalnoi vibratsii na funktsionalnyi stan pratsivnykiv mashynobudivnoho vyrobnytstva' [The impact of local vibration on the functional state of machine-building workers.], *Okhorona pratsi i promyslova bezpeka* [Labor protection and industrial safety], no 3, Pp. 22–28.
6. Sydorenko, LM 2020, 'Hihiienichna otsinka vibratsiinoho navantazhennia u metaloobrobnykh tsekhakh' [Hygienic assessment of vibration exposure in metalworking shops.], *Hihiiena pratsi* [Occupational Hygiene], no 2(58), Pp. 34–39. (in Ukraine)
7. Kovalenko, OV 'Osoblyvosti vymiriuvannia vibratsiinoho navantazhennia na verstatnomu obladnanni' [Features of measuring vibration load on machine tool equipment], *Naukovi visti NTUU «KPI»* [«KPI Science News»], no 5, Pp. 44–50. (in Ukraine)
8. Petrov, V, Ivanchenko, D & Marchenko, S 2021, 'Analysis of vibration exposure and hand-arm risks in metal processing industries', *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 84, Pp. 103-167. (in Ukraine)
9. Zhang, Y & Wang, L 2022, 'Hand-transmitted vibration and operator performance: A systematic review of health effects and exposure levels', *Journal of Occupational Health*, Vol. 64, Pp. 23-45.

Submission received: 08/14/2025 Accepted: 09/22/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02
УДК 621.923

Ф.В. НОВІКОВ, доктор технічних наук
професор кафедри здорового способу життя, технологій та безпеки життєдіяльності
e-mail: novikovfv@hneu.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6996-3356
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
проспект Науки, 9-А, м. Харків, 61166, Україна

ДІАГНОСТИКА ТА УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Метою роботи є створення нового теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності. Для цього в роботі встановлено аналітичні залежності для визначення енергетичних параметрів процесу шліфування: умовного напруження різання (енергомісткості обробки) і коефіцієнта шліфування (відношення тангенціальної і радіальної складових сили різання), які протилежно пов'язані з умовним кутом зсуву оброблюваного матеріалу. Виходячи із цього, розрахунками доведено, що зменшуючи експериментально встановлену тангенціальну складову сили різання, можна завжди досягти рівності значень умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, які визначаються умовним напруженням різання і коефіцієнтом шліфування. Виконання цієї умови забезпечує відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування, що є новим в теорії обробки матеріалів різанням. Розрахунками встановлено, що під час алмазно-іскрового шліфування частка енергії тертя приймає фактично нульове значення, оскільки, завдяки дії електричних розрядів в зоні різання, забезпечується висока ріжуча здатність алмазного круга на металевій зв'язці та виключається його тертя із оброблюваним матеріалом. Фактично нульове значення частки енергії тертя отримано і в умовах мікрорізання одиничним алмазним зерном. Все це вказує на достовірність запропонованого в роботі теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування.

Також встановлено, що в умовах звичайного абразивного шліфування частка енергії тертя може перевищувати частку енергії «чистого» різання. Це пов'язано із низькою ріжучою здатністю абразивного круга, оскільки значна частина абразивних зерен працює лише в режимі тертя з оброблюваним матеріалом. Показано, що розрахункові значення коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) мало відрізняються та фактично відповідають значенням відомого відношення товщини мікрозрізу до радіусу вершини абразивного зерна, за якими процес стружкоутворення в зоні різання майже не відбу-вається. В цих випадках важливо застосовувати ефективні методи правлення та імпрегнування шліфувальних кругів, ефективні технологічні середовища для підвищення їх ріжучої здатності. Отже знання реально встановлених значень коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) на основі запропонованого теоретичного рішення відкриває нові технологічні можливості підвищення ефективності процесу шліфування та створення високопродуктивних технологічних процесів обробки деталей машин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *сила різання, енергомісткість обробки, коефіцієнт тертя, продуктивність обробки, математична модель*

Як цитувати: Новіков Ф. В. Діагностика та умови підвищення ефективності процесу шліфування на основі енергетичних параметрів. *Машинобудування*. 2025. Вип. 35 С. 14-25. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02

© Новіков Ф.В., 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

Процеси різання матеріалів є основними у технології виготовлення деталей машин. Вони характеризуються високими показниками продуктивності та якості обробки, що пов'язано з відносно низькою енергомісткістю процесу різання порівняно з іншими процесами фізико-технічної обробки. Найбільший ефект досягається в умовах різанням лезовими інструментами [1]. Під час шліфування, особливо високотвердих матеріалів, навпаки, енергомісткість та сили і температура різання збільшуються, а це приводить до появи на оброблюваних поверхнях різних дефектів (припікань, мікротріщин, мікросколів тощо) та зниження якості обробки [2, 3]. Для зменшення силової напруженості процесу шліфування застосовують алмазні круги, в тому числі, на металевих зв'язках, та прогресивні електрофізикохімічні методи їх правлення, ефективні технологічні середовища [4, 5]. Важливого значення набули процеси переривчастого шліфування. які дозволяють отримати подвійний ефект обробки: одно-часно забезпечити високу різальну здатність шліфувального круга та зменшити температуру шліфування [6]. Однак вибір раціональних умов шліфування при цьому здійснюють без проведення достатньо глибокої діагностики процесу, особливо, без встановлення часток енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, оскільки наявність інтенсивного тертя приводить до суттєвого збільшення енергомісткості, сили та температури різання. Тому управління енергією тертя в зоні обробки та забезпечення можливості її зменшення до нуля є важливим кроком підвищення ефективності шліфування. Для цього потрібно вміти науково обґрунтовано підходити до відокремлення частки енергії тертя від загальної енергії, що витрачається під час шліфування, та на цій основі розробляти високопродуктивні й високоякісні технологічні процеси обробки деталей машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними методами дослідження закономірностей процесу шліфування традиційно є експериментальні методи, які дозволяють встановити основні технологічні параметри шліфування в залежності від параметрів режиму шліфування, характеристик шліфувальних кругів та оброблюваних матеріалів. На цій основі створено емпіричні моделі процесів шліфування для розрахунку оптимальних умов обробки. Однак вони не розкри-вають фізичну сутність процесу шліфування, оскільки в них відсутні взаємозв'язки між вхідними і вихідними параметрами. Тому на зміну емпіричним моделям процесів шліфування прийшли математичні (аналітичні) моделі [7, 8]. Їх призначення – встановлення внутрішніх зв'язків (параметрів) між вхідними і вихідними параметрами процесу шліфування на основі таких фізичних величин, як імовірнісна товщина зрізу окремим зерном шліфувального круга; механічне навантаження, що діє на окреме зерно; імовірнісні закони виступу зерен над зв'язкою шліфувального круга; величина зношування ріжучого зерна тощо [9 – 11]. Практичне застосування цих математичних моделей дозволило отримати більш узагальнені рішення порівняно з емпіричними моделями. Але серед наведених фізичних величин, на яких засновано математичні (аналітичні) моделі процесу шліфування, відсутні такі важливі величини, як частки енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, які є визначальними в забезпеченні суттєвого підвищення показників продуктивності, якості та точності обробки. Тому встановлення цих величин на основі математичного моделювання процесу шліфування та застосування відповідних експериментальних даних є актуальним завданням, що має важливе теоретичне і практичне значення в подальшому розширенні технологічних можливостей процесу шліфування.

Постановка проблеми

У роботі [12] наведено математичну (аналітичну) модель визначення параметрів силової напруженості процесу шліфування: тангенціальної і радіальної складових сили різання, умовного напруження різання (енергомісткості обробки) для процесу «чистого» різання без урахування сили тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. Встановлені аналітичні залежності пов'я-зують параметри силової напруженості процесу шліфування із такою важливою фізичною величиною, як умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, що може змінюватися в межах 0 - 45°. Тому, якщо підкорити теоретичні рішення експериментально встановленим значенням тангенціальної і ра-діальної складових сили різання, то можна визначити частки енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування. А це дозволить на основі діагностики процесу шліфування розкрити його фізичну сутність та спрогнозувати подальші дії щодо суттєвого зменшення енергії (сили) тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом, енергомісткості обробки, температури шліфування та, в цілому, підвищити його ефективність [12, 13]. Запропонований підхід є принципово новим, відсутнім в науково-технічній літературі.

Метою роботи є створення нового теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети скористаємося аналітичними залежностями для визначення тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання [13]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум}; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma}{K_ш} \cdot S_{сум}, \quad (2)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м^2; $S_{сум} = Q / V_{кр}$ – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами шліфувального круга, м^2; $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – продуктивність обробки, м^3/с; $V_{дет}$ – швидкість деталі, м/с; B – ширина шліфування, м; t – фактична глибина шліфування, м; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с; $K_ш$ – коефіцієнт абразивного різання (коефіцієнт шліфування).

У роботі [13] також наведено аналітичні залежності для визначення умовного напруження різання σ та коефіцієнта шліфування $K_ш = P_z / P_y$:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ст}}{tg\beta}; \quad (3)$$

$$K_ш = tg2\beta, \quad (4)$$

де $\sigma_{ст}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м^2; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу.

Залежності (3) і (4) справедливі для умов «чистого» різання, коли в процесі шліфування відсутнє тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Використовуючи експериментально встановлені значення умовного напруження різання $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q$ та коефіцієнта шліфування $K_ш = P_z / P_y$, за залежностями (3) і (4) можна визначити значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2. Параметри P_z, P_y і $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ встановлюються на основі експериментальних даних.

Для умов «чистого» різання розраховані за цими залежностями значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2 будуть приблизно однаковими. За наявності в процесі шліфування тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом значення кутів β_1 і β_2 будуть відрізнятися.

Отже, використовуючи залежності (3) і (4), можна проводити діагностику процесу шліфування за енергетичними параметрами σ і $K_ш = P_z / P_y$. Якщо виявиться, що встановлені значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2

приблизно рівні, можна зробити висновок щодо високої ефективності процесу шліфування. У цьому випадку фактично виконується умова «чистого» різання, що виключає інтенсивне тертя в зоні шліфування та збільшення сили і температури різання, дозволяє підвищити показники якості, точності та продуктивності обробки. Якщо розраховані значення кутів β_1 і β_2 відрізняються, то це свідчить про порушення енергетичного балансу в процесі різання, оскільки значна частина енергії, яка споживається в процесі шліфування, йде на подолання сили тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Для оцінювання запропонованого рішення проведено експериментальні дослід-ження параметрів процесу плоского шліфування за пружною схемою з радіальним зусиллям $P_y = 60$ Н плоского зразка із сталі Р18 ($\sigma_{cm} = 3600$ Н/м^2) абразивним кругом 24А40М36К5 з режимом шліфування: швидкість круга – $V_{кр} = 26$ м/с; швидкість деталі – $V_{дет} = 6$ м/хв; ширина шліфування – B=10 мм.

Результати досліджень наведено у табл. 1. Встановлено, що зі збільшенням часу обробки фактична глибина шліфування t, а, відповідно, і продуктивність обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ зменшилися дуже значно – у 12,3 рази.

При цьому тангенціальна складова сили різання P_z, коефіцієнт шліфування $K_ш = P_z / P_y$ та потужність шліфування N зменшилися незначно – менше, ніж у 2 рази. Отже, користуючись лише наведеними експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які привели до суттєвої зміни продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$. Тому слід скористатися залежностями (3) і (4) для встановлення чинників, що привели до зменшення продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ в 12,3 рази зі збільшенням часу обробки.

Таблиця 1

Вплив часу обробки на параметри шліфування за пружною схемою плоских зразків із сталі Р18 ($V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 6$ м/хв; B=10 мм; $P_y = 60$ Н)

Table 1

The influence of processing time on the parameters of grinding according to the elastic scheme of flat samples made of steel P18 ($V_{кр} = 26$ m/s; $V_{дет} = 6$ m/min; B=10 mm; $P_y = 60$ N)

Номер експерименту	Час обробки τ, хв	Фактична глибина шліфування t за 5 проходжень, мм	Продуктивність обробки Q, мм^3/хв	Потужність шліфування N, Вт	Тангенціальна складова сили різання P_z, Н	Коефіцієнт шліфування $K_ш$	Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$, Н/ мм^2
1	0,1	0,037	2220	840	28,8	0,480	22,7
2	0,5	0,013	780	854	22,4	0,373	65,7
3	1,0	0,008	480	630	21,5	0,358	78,7
4	2,0	0,006	360	522	17,9	0,299	87,0
5	3,0	0,005	300	480	16,4	0,273	96,0
6	5,0	0,003	180	450	15,2	0,253	150,0

Очевидно, основним чинником такого різкого зменшення глибини шліфування є інтенсивне зношування ріжучих зерен та затуплення шліфувального круга. У результаті процес різання з часом обробки фактично переходить до процесу тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом.

У табл. 2 наведено розраховані за залежностями (3) і (4) значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2, розрахункові значення тангенціальної складової сили різання P_z та коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ (за умов «чистого» різання), коефіцієнта тертя f.

Таблиця 2
Розрахункові значення параметрів шліфування
Table 2
Estimated values of grinding parameters

Номер експе-рименту	Час обробки τ, хв	Умовний кут зсуву оброблювано го матеріалу β_1, град.	Умовний кут зсуву оброблювано го матеріалу β_2, град.	Умова $\beta_1 = \beta_2$, град.	Тангенціальна складова сили різання $P_{z.p}$, Н	Коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$	Коефі-цієнт тертя f
1	0,1	9	12,8	10,8	23,9	0,3984	0,0816
2	0,5	3,1	10,25	5,7	12,28	0,2033	0,1697
3	1,0	2,6	9,85	5,2	10,965	0,1825	0,1755
4	2,0	2,4	8,35	4,5	9,487	0,1588	0,1402
5	3,0	2,2	7,65	4,1	8,528	0,1418	0,1312
6	5,0	1,3	7,1	3,1	6,536	0,1088	0,1442

Як випливає з табл. 2, для всіх проведених експериментів має місце розходження значень кутів β_1 і β_2. Наприклад, для першого експерименту $\beta_1 = 9^o$ і $\beta_2 = 12{,}8^o$. При цьому значення кутів β_1, розрахованих за залежністю (3), менше аналогічних значень кутів β_2, розрахованих за залежністю (4). Це свідчить про те, що у зоні шліфування, поруч із процесом «чистого» різання, відбувається інтенсивне тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Для визначення частки енергії «чистого» різання та частки енергії тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом (у загальному енергетичному балансі процесу шліфування) слід домогтися рівності значень кутів β_1 і β_2 у залежностях (3) і (4). Це досягається зменшенням експериментально встановленої тангенціальної складової сили різання P_z на величину сили тертя. У результаті функція $tg\beta_1$ буде збільшуватися, а функція $tg\beta_2$ – буде зменшуватися, що призведе до досягнення рівності значень кутів β_1 і β_2.

Для здійснення розрахунків необхідно послідовно в однакову кількість разів зменшити значення тангенціальної складової сили різання P_z в залежностях (3) і (4). У результаті встановлено (табл. 2), що для 1-го експерименту зі зменшенням тангенціальної складової сили різання P_z в 0,83 рази кути β_1 і β_2 набувають однакового значення, рівного 10,8°. Тоді коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$, що відповідає умові «чистого» різання, дорівнює $K_{ш.p}$ = 0,398, тобто приймає значення, яке в 0,83 рази менше експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}48$, що враховує як умови «чистого» різання, так і умови тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Коефіцієнт тертя f дорівнює різниці експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}48$ і розрахункового значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.p} = 0{,}3984$, що відповідає умові «чистого» різання, тобто дорівнює значенню f = 0,0816.

Частка енергії «чистого» різання у загальному енергетичному балансі процесу шліфування становить 83%, частка енергії тертя – 17%.

Для 6-го експерименту (табл. 1) кути β_1 і β_2 також приймають різні значення, відповідно, β_1=1,3° і β_2=7,1°. Отже, поряд з процесом «чистого» різання, при шліфуванні має місце інтенсивне тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Для визначення умов «чистого» різання необхідно в розрахунках забезпечити рівність значень кутів β_1 і β_2. Як і в попередньому випадку, зменшуючи тангенціальну складову сили різання P_z в 0,43 рази, досягнуто однакових значень кутів $\beta_1 = \beta_2$=3,1°. Виходячи з цього, коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$, що відповідає умові «чистого» різання, дорівнює $K_{ш.p} = 0{,}1088$, тобто приймає значення, яке в 0,43 рази менше експериментально встановленого

значення коефіцієнта шліфування $K_{ш}$ = 0,253, що враховує як умови чистого різання, так і умови тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Коефіцієнт тертя f дорівнює різниці експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}253$ і розрахункового значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р} = 0{,}1088$, що відповідає умові «чистого» різання, тобто коефіцієнт тертя дорівнює f = 0,1442.

Частка енергії «чистого» різання у загальному енергетичному балансі процесу шліфування становить 43%, а частка енергії тертя – 57%. Отже, частка енергії тертя перевищує частку енергії «чистого» різання, що пов'язано із низькою ріжучою здатністю абразивного круга, оскільки значна частина абразивних зерен працює лише в режимі тертя з оброблюваним матеріалом. При цьому розрахункові значення коефі-цієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) мало відрізняються. Цим і пояснюється суттєве зменшення продуктивності обробки – у 12,3 рази – з часом обробки (табл. 1) та дозволяє більш повно розкрити фізичну сутність і технологічні можливості процесу шліфування [14].

Проведемо теоретичний аналіз зміни коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ зі збільшенням часу обробки. Для цього встановимо аналітичний зв'язок між коефіцієнтом шліфування $K_{ш.р}$ та відношенням товщини мікрозрізу a_z і радіусу вершини абразивного зерна R (рис. 1).

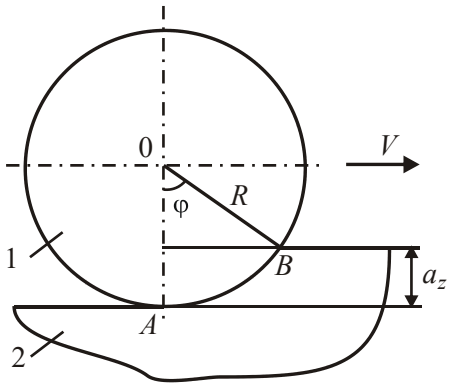

Рис. 1 – Розрахункова схема відношення a_z / R: 1 – абразивне зерно; 2 – оброблюваний матеріал

Fig. 1 – Calculation scheme of the relationship a_z / R: 1 – abrasive grain; 2 – processed material

Якщо прийняти, що тангенціальна складова сили різання $P_{z.p}$ пропорційна товщині мікрозрізу a_z, а радіальна складова сили різання $P_{y.p}$ пропорційна довжині дуги контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом АВ (рис. 1), то параметр $K_{ш.р}$ виразиться:

$$K_{ш.р} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \frac{a_z}{R \cdot sin\varphi}, \qquad (5)$$

де $sin\varphi = \frac{\sqrt{R^2 - (R - a_z)^2}}{R} = \frac{a_z}{R} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{a_z} - 1}$.

Тоді

$$K_{ш.р} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \sqrt{\frac{a_z}{2 \cdot R - a_z}}. \qquad (6)$$

Оскільки $R >> a_z$, то залежність (6) спроститься:

$$K_{ш.р} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \sqrt{\frac{a_z}{2 \cdot R}}. \qquad (7)$$

У табл. 3 наведено розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ в залежності від відношення a_z / R.

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$

Table 3

Calculated values of the grinding coefficient $K_{ш.р}$

a_z / R	0,02	0,04	0,08	0,1	0,14	0,2	0,35	0,5
$K_{ш.р}$	0,1	0,14	0,2	0,224	0,264	0,316	0,418	0,5

Як показано в роботі [13], процес тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом (під час процесу мікрорізання) розпочинається і, відповідно, припиняється за умови досягнення відношення товщини мікрозрізу a_z і радіусу вершини абразивного зерна *R* значень $a_z / R = 0{,}04 \ ... \ 0{,}14$.

Згідно табл. 3, зі збільшенням відношення a_z / R значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ збільшуються. За умови $a_z / R = 0{,}02 \ \dots \ 0{,}08$ коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ приймає значення, які відповідають значенням коефіцієнта тертя абразивного зерна із оброблюваним матеріалом. Тому за цих умов процес мікрорізання не відбувається, а здійснюється лише процес тертя абразивного зерна із оброблюваним матеріалом. Процес мікрорізання розпочинається з більших значень відношення a_z / R.

Отже, розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$, які наведено в табл. 3, погодяться з отриманими даними (табл. 2). Як видно, коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ змінюється в діапазоні 0,398 … 0,1088. Згідно табл. 3, в діапазоні $a_z / R = 0{,}04 \ ... \ 0{,}14$ має місце пластичне деформування оброблюваного матеріалу фактично без утворення мікростружок. Тому частина значень коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$, починаючи з 0,264, входить до цього діапазону, що вказує майже на припинення знімання оброблюваного матеріалу. У результаті фактична глибина шліфування *t* приймає дуже малі значення, на рівні 0,006 – 0,003, що приводить до суттєвого зменшення продуктивності обробки.

Цим показано, що зменшення продуктивності обробки *Q* з часом (табл. 1) пов'язано зі збільшенням умовного напруження різання σ через інтенсивне зношування та затуплення шліфувального абразивного круга. Отже, в процесі шліфування необхідно домагатися зменшення умовного напруження різання σ завдяки підвищенню ріжучої здатності шліфувального круга. В цих випадках важливо застосовувати ефективні методи правлення та імпрегнування шліфувальних кругів, ефективні технологічні середовища, процеси вібраційного та переривчастого шліфування [10, 15].

Цього можна досягти також застосуванням методу алмазно-іскрового шліфування [16, 17], сутність якого полягає в підведенні в зону шліфування електричного струму у формі електричних розрядів для електроерозійного руйнування металевої зв'язки алмазного круга і стружок, що утворюються, та забезпечення високої ріжучої здатності алмазного круга. У результаті під час шліфування фактично виключається процес тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом, забезпечується суттєве зменшення сили і температури різання, підвищення показників якості, точності та продуктивності обробки.

У табл. 4 наведено отримані експериментальні значення основних показників алмазно-іскрового шліфування (із щільністю електричного струму $0{,}6 \cdot 10^5$ А/мм^2) зразка із твердого сплаву ВК8 ($\sigma_{ст} = 3600$ Н/м^2), які отримано під час шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці 1А1 $300 \times 40 \times 127 \times 5$ АС6 250/200 М2-01 4 за пружною схемою ($P_y = const$; $V_{кр} = 28$ м/с; *Рв* – вага), показаною на рис. 2. Умовне напруження різання визначено за залежністю $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q$. Як видно, у всіх трьох розглянутих випадках (P_y = 40 Н; 60 Н і 80 Н) значення кутів β_1 і β_2 майже співпадають. Це вказує на те, що під час алмазно-іскрового шліфування фактично відсутнє тертя алмазного круга на металевій зв'язці із оброблюваним матеріалом. Отже має місце процес «чистого» різання, що вказує на ефективність застосування на практиці цього прогресивного методу шліфування.

Таблиця 4
Експериментальні та розрахункові значення параметрів алмазно-іскрового шліфування
Table 4
Experimental and calculated values of diamond spark grinding parameters

Нормальна складова сили різання P_y, Н	Тангенціальна складова сили різання P_z, Н	Коефіцієнт шліфування $K_ш$	Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$, Н/ мм^2	Продуктивність обробки Q, мм^3/хв	Умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β_1, град.	Умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β_2, град.
40	9,2	0,23	46	344	5,0	6,5
60	12,6	0,21	39	556	6,0	6,0
80	16,0	0,2	36,6	755	6,2	5,7

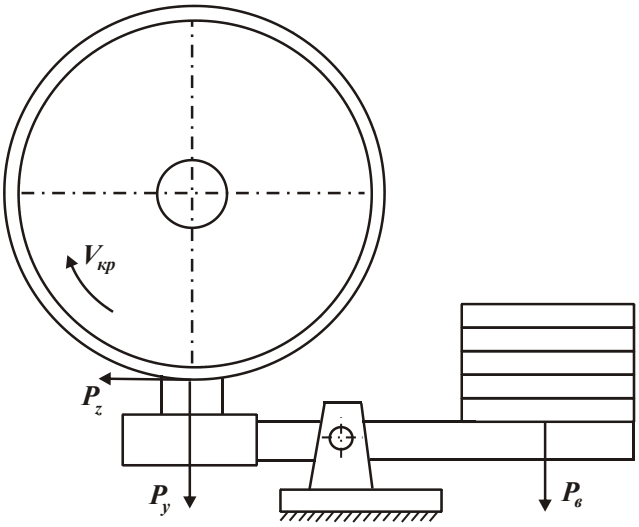

Рис. 2 – Схема пристрою для реалізації процесу алмазно-іскрового шліфування за пружною схемою
Fig. 2 – Diagram of a device for implementing the process of diamond spark grinding according to an elastic scheme

Такими ж високими технологічними показниками характеризується метод алмазного шліфування із безперервним автономним електрохімічним правленням алмазного круга на металевій зв'язці [11, 14]. Він отримав широке практичне застосування, особливо, в умовах шліфування виробів із твердих сплавів. Для оцінювання його технологічних можливостей було проведено експериментальні дослідження продуктивності обробки та тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання під час глибинного високопродуктивного круглого зовнішнього шліфування за жорсткою схемою циліндричної фрези (діаметром 160 мм) з ріжучими пластинами з твердого сплаву Т5К10 ($\sigma_{ст} = 4450$ Н/м^2) алмазним кругом на металевій зв'язці 1А1 300х25х5 АС6 200/160 М2-01 4. Умови обробки: $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 1$ м/хв; $t = 0{,}25$ мм; $B = 25$ мм. У результаті проведення експериментальних досліджень встановлено: $K_ш = 0{,}67$ ($P_z = 110$ Н; $P_y = 164{,}2$ Н). Умовне напруження різання дорівнює $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q = 36960$ Н/мм^2 (для $Q = 6250$ мм^3/хв). Розрахунками встановлено: $\beta_1 = 7{,}5^o$; $\beta_2 = 16{,}9^o$. Як видно, значення кутів β_1 і β_2 значно відрізняються. Це пов'язано зі значною продуктивністю обробки і значним тертям алмазного круга із оброблюваним матеріалом. Умова $\beta_1 = \beta_2 = 11{,}1^o$ досягається шляхом зменшення тангенціальної складової сили різання P_z = 110 Н в 0,61 рази, тобто до значення P_z = 67,1 Н. Тоді коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ =

0,4087, частки енергії «чистого» різання і тертя, відповідно, дорівнюють: 0,61% і 0,39 %. Коефіцієнт тертя $f = 0{,}2613$.

Слід зазначити, що за наведених умов високопродуктивного глибинного шліфування без застосування безперервного автономного електрохімічного або електроерозійного правлення алмазний круг на металевій зв'язці швидко втрачає ріжучу здатність і процес шліфування фактично нездійсненний [9, 18].

Для перевірки достовірності наведеного в роботі теоретичного рішення визначено значення кутів β_1 і β_2 для умов мікрорізання одиничним алмазним зерном АС50 твердого сплаву Т15К6 ($\sigma_{cm} = 3900$ Н/м^2) із товщиною мікрозрізу $a_z = 8$ мкм і $V_{кр} = 35$ м/с, які отримано професором Узуняном М. Д. і наведено у роботі [16]. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено: $K_{ш} = 0{,}48$; $\sigma =$ 20000 Н/мм^2. Відповідно, розрахунками визначено: $\beta_1 = 11^{\circ}$; $\beta_2 = 12{,}8^{\circ}$. Отже, значення кутів β_1 і β_2 незначно відрізняються, тобто в процесі мікрорізання має місце лише незначне тертя алмазного зерна з оброблюваним матеріалом. Також встановлено, що умова $\beta_1 = \beta_2 = 12^{\circ}$ виконується при зменшенні тангенціальної складової сили різання P_z в 0,93 рази, тобто при зменшенні коефіцієнта шліфування до значення $K_{ш.р} = 0{,}446$ та збільшенні умовного напруження різання σ до значення 18600 Н/мм^2. При цьому коефіцієнт тертя набуває невеликого значення $f = 0{,}034$, тобто процес мікрорізання одиничним алмазним зерном фактично здійснюється в умовах «чистого» різання. Це повністю підтверджує достовірність наведеного в роботі теоретичного рішення щодо розподілу часток енергій «чистого» різання і тертя в процесі шліфування. Отже знання встановлених значень коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) на основі запропонованого теоретичного рішення відкриває принципово нові технологічні можливості для визначення параметрів шліфування [19], підвищення ефективності процесу шліфування та створення високопродуктивних технологічних процесів обробки деталей машин.

Висновки

У роботі наведено новий теоретичний підхід до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності. Сутність підходу зводиться до встановлення однакових розрахункових значень умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу від зміни умовного напруження різання (енергомісткості обробки) і коефіцієнта шліфування (відношення тангенціальної і радіальної складових сили різання) через зменшення експериментально встановленої тангенціальної складової сили різання. На конкретних прикладах обґрунтовано достовірність запропонованого підходу та надано практичні рекомендації щодо зменшення енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в процесі шліфування та підвищення його ефективності.

Конфлікт інтересів

Автор повідомляє про відсутність конфлікта інтересів. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищих навчальних закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. – 3-тє вид. переробл. та доповн. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с. – Режим доступу : https://ns2000.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/Osnovy-teorii-rizan.mater.pdf (дата звернення 20.11 2025)
2. Salata M. The Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Grinding Temperature in the Single-Pass Grinding Process of Solid Carbide End Mill Flutes / M. Salata // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2022. – № 16(1). – Pp. 190–202. – DOI: 10.12913/22998624/143483 .
3. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 2(10). – С. 41-49. DOI: 10.20998/2079–004X.2024.2(10).05
4. Лавриненко В. І. Інструменти із надтвердих матеріалів в технологіях абразивної і фізико-технічної обробки : монографія / В. І. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Кам'янське : ДДТУ, 2016. – 529 с. – Режим доступу : https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-b3.pdf (дата звернення 20.11 2025)
5. Increasing the Continuous Operation Time of the Diamond Cutting Disk When Using Various Cooling Media / T. Chumachenko, A. Bespalova, O. Dashkovska, O. Knush, T. Nikolaieva // Advanced Manufacturing Processes V. Selected Papers from the 6th Grabchenko's. International Conference on Advanced. Manufacturing Processes (InterPartner-2024), September 10-13 2024. – Odessa, 2025. – Pp. 266–279. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_24
6. Influence of the geometric characteristics of the discontinuous profile working surfaces of abrasive wheels for precision and temperature when grinding / O. Yakimov et al. // Cutting & Tools in Technological System. – 2021. – no 94. – Pp. 115–125. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.13
7. Stachurski W. Determination of Mathematical Formulae for the Cutting Force F C during the Turning of C45 Steel / Stachurski, W., Midera, S. Kruszynski, B. // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2012. – № 16 (2). – Pp. 73-79. – URL: http://kdm.p.lodz.pl/journal-mechanics-and-mechanical-engng/artykuly# (Last accessed 20 November 2025)
8. Discontinuous Generating Gear Grinding Optimization / Larshin V., Babiychuk O., Lysyi O., Uminsky S. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – Pp. 263-272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_26 https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorld=57217107788
9. Гуцаленко Ю. Г. Алмазно-іскрове шліфування матеріалів високої функціональності : монографія. / Ю. Г. Гуцаленко. – Харків : Курсор, 2018. – 290 с. – Режим доступу : https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/Gutsalenko_Almazno-iskrovoe_2018.pdf (дата звернення 20.11 2025)
10. Mitsyk A. Wave Nature of the Abrasive Granules Action on the Surface of Parts During Vibration Processing / A. Mitsyk, V. Fedorovich, A. Grabchenko // Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2023. – Pp. 176–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_17
11. Пижов І. М. Удосконалення процесу алмазного шліфування надтвердих матеріалів за рахунок управління контактними напруженнями [Електронний ресурс] : монографія / І. М. Пижов, В. О. Федорович, І. В. Волошкіна ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2022. – 148 с. – Режим доступу : http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57208. (дата звернення 20.11 2025)
12. Новіков Ф. В. Теоретико-імовірнісний підхід у теорії шліфування [Електронний ресурс] : монографія / Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков. – Дніпро : ЛІРА, 2023. – 484 с. – URI: http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30087 (дата звернення 20.11 2025)
13. Justification of Technological Possibilities for Reducing Surface Roughness During Abrasive Processing / F. Novikov et al. // Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. – 2021. – Pp. 463-471. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_46
14. Інтегровані процеси обробки матеріалів різанням : підручник / А. І. Грабченко [та ін.] ; ред.: А. І. Грабченко, В. О. Залога. – Суми : Університетська книга, 2017. – 451 с. – URI: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27607 (дата звернення 20.11 2025)
15. The use of intermittent wheels, impregnated by the contact method to reduce the thermal stress of the grinding process / V. Tonkonogyi et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708, Issue 1. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012034 .
16. Узунян М. Д. Алмазно-іскрове шліфування твердих сплавів / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с. – URI : https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/7396 (дата звернення 20.11 2025)
17. Стрельчук Р. М. Формування поверхні в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків : УІПА, 2021. – Вип. 28. – С. 26–36. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-28-26-36 (дата звернення 30.10 2025)
18. Дослідження впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування / М. І. Гасанов, О. В. Руднєв, О. В. Котляр, О. В. Тітаренко, Д. В. Куліна // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 1 (11). – С. 117–127. DOI: 10.20998/2079-004X.2025.1(11).14

19. Полянський В. І. Закономірності формування і зниження температури різання при механічній обробці / В. І. Полянський // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. – Маріуполь : ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2019. – Вип. 39. – С. 119–126. (Технічні науки). DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019

Отримано: 19.10.2025 Прийнято: 20.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

F.V. NOVIKOV, Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of Healthy Lifestyle, Technologies and Life Safety
e-mail: novikovfv@hneu.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6996-3356
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9-A Nauky Avenue, Kharkiv 61166, Ukraine

DIAGNOSTICS AND CONDITIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE GRINDING PROCESS BASED ON ENERGY PARAMETERS

The aim of the work is to create a new theoretical approach to the diagnostics of the grinding process based on the separation of the share of friction energy of the grinding wheel with the processed material from the total energy balance of the grinding process and to establish under these conditions the directions for increasing its efficiency. For this purpose, the work establishes analytical dependencies for determining the energy parameters of the grinding process: the conditional cutting stress (processing energy intensity) and the grinding coefficient (the ratio of the tangential and radial components of the cutting force), which are inversely related to the conditional shear angle of the processed material. Based on this, calculations have proven that by reducing the experimentally established tangential component of the cutting force, it is always possible to achieve equality of the values of the conditional shear angle of the processed material, which are determined by the conditional cutting stress and the grinding coefficient. Fulfillment of this condition ensures separation of the friction energy fraction of the grinding wheel with the processed material from the total energy balance of the grinding process, which is new in the theory of material processing by cutting. Calculations have established that during diamond spark grinding the friction energy fraction takes on a virtually zero value, since, due to the action of electric discharges in the cutting zone, a high cutting ability of the diamond wheel on the metal bond is ensured and its friction with the processed material is eliminated. A virtually zero value of the friction energy fraction was also obtained under the conditions of microcutting with a single diamond grain. All this indicates the reliability of the theoretical approach to the diagnostics of the grinding process proposed in the work.

It was also established that under the conditions of conventional abrasive grinding, the share of friction energy can exceed the share of "clean" cutting energy. This is due to the low cutting ability of the abrasive wheel, since a significant part of the abrasive grains work only in the friction mode with the processed material. It is shown that the calculated values of the friction coefficient and the grinding coefficient ("clean" cutting) differ little and actually correspond to the values of the known ratio of the micro-cut thickness to the radius of the abrasive grain tip, at which the chip formation process in the cutting zone almost does not occur. In these cases, it is important to use effective methods of dressing and impregnation of grinding wheels, effective technological environments to increase their cutting ability. Therefore, knowledge of the actually established values of the friction coefficient and the grinding coefficient ("clean" cutting) based on the proposed theoretical solution opens up new technological possibilities for increasing the efficiency of the grinding process and creating high-performance technological processes for processing machine parts.

KEYWORDS: *cutting force, processing energy intensity, friction coefficient, processing productivity, mathematical model*

In cites: Novikov F.V. (2025) Diagnostics and conditions for increasing the efficiency of the grinding process based on energy parameters. *Engineering*, (35), 14-25. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02 (in Ukraine)

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest. In addition, the author fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Mazur, MP, Vnukov, YuM, Hrabchenko, AI et al 2020, *Osnovy teorii rizannia materialiv* [Fundamentals of material cutting theory], Novyi Svit-2000, Lviv, 471 p. (in Ukraine)
2. Salata, M 2022, 'The Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Grinding Temperature in the Single-Pass Grinding Process of Solid Carbide End Mill Flutes', *Advances in Science and Technology Research Journal*, no 16(1), Pp. 190–202. DOI: https://doi.org/10.12913/22998624/143483.
3. Strelchuk, RM 2024, 'Rehuliuvannia teplovymy protsesamy pid chas elektroeroziinoho shlifuvannia zi zmin-noiu poliarnistiu elektrodiv [Regulation of thermal processes during electroerosive grinding with variable electrode Polarity.], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 2(10), Pp. 41-49. DOI: https://doi.org/10.20998/2079–004X.2024.2(10).05 (in Ukraine)
4. Lavrynenko, VI & Solod, VYu 2016, *Instrumenty iz nadtverdykh materialiv v tekhnolohiiakh abrazyvnoi i fizyko-tekhnichnoi obrobky* [Tools made of superhard materials in abrasive and physical and technical processing technologies], DDTU, Kamianske. (in Ukraine)
5. Chumachenko, T, Bespalova, A, Dashkovska, O, Knush, O & Nikolaieva , T 2025, 'Increasing the Continuous Operation Time of the Diamond Cutting Disk When Using Various Cooling Media', *Advanced Manufacturing Processes V. Selected Papers from the 6th Grabchenko's. International Conference on Advanced. Manufacturing Processes (InterPartner-2024), September 10-13 2024*, Pp. 266–279. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_24
6. Yakimov, O et al 2021, 'Influence of the geometric characteristics of the discontinuous profile working surfaces of abrasive wheels for precision and temperature when grinding', *Cutting & Tools in Technological System*, no 94, Pp. 115–125. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.13
7. Stachurski, W, Midera, S & Kruszynski, B 2012, 'Determination of Mathematical Formulae for the Cutting Force F C during the Turning of C45 Steel', *Mechanics and Mechanical Engineering*, no 16 (2), Pp. 73-79.
8. Larshin, V, Babiychuk, O, Lysyi, O & Uminsky, S 2022, 'Discontinuous Generating Gear Grinding Optimization', *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Pp. 263-272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_26
9. Hutsalenko, YuH 2018, *Almazno-iskrove shlifuvannia materialiv vysokoi funktsionalnosti* [Diamond spark grinding of high-performance materials], Kursor, Kharkiv (in Ukraine)
10. Mitsyk, A, Fedorovich, V & Grabchenko, A 2023, 'Wave Nature of the Abrasive Granules Action on the Surface of Parts During Vibration Processing', *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Pp. 176–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_17
11. Pyzhov, IM, Fedorovych, VO & Voloshkina, IV 2022, *Udoskonalennia protsesu almaznoho shlifuvannia nadtverdykh materialiv za rakhunok uprav-linnia kontaktnymy napruzhenniamy* [Improving the process of diamond grinding of superhard materials by controlling contact stresses], Kharkiv (in Ukraine)
12. Novikov, FV & Novikov, HV 2023, *Teoretyko-imovirnisnyi pidkhid u teorii shlifuvannia* [Theoretical-improbable approach in grinding theory], LIRA, Dnipro, viewed < http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30087> (in Ukraine)
13. Novikov, F et al 2021, 'Justification of Technological Possibilities for Reducing Surface Roughness During Abrasive Processing', *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, Pp. 463-471. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_46
14. Hrabchenko, AI et al 2017, *Intehrovani protsesy obrobky materialiv rizanniam* [Integrated processes for processing materials in various], Universytetska knyha, Sumy, viewed <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27607> (in Ukraine)
15. Tonkonogyi, V et al 2019, 'The use of intermittent wheels, impregnated by the contact method to reduce the thermal stress of the grinding process' *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 708, Isue 1. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012034.
16. Uzunian, MD 2003, *Almazno-iskrove shlifuvannia tverdykh splaviv* [Diamond spark grinding of hard alloys], NTU "KhPI", Kharkiv, viewed <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/7396> (in Ukraine)
17. Strelchuk, RM 'Formuvannia poverkhni v umovakh elektroeroziinoho shlifuvannia zi zminnoiu poliarnis-tiu elektrodiv' [Surface formation under the conditions of electroerosion grinding with variable polarity of electrodes], *Mashynobuduvannia*, iss. 28, Pp. 26–36, DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-28-26-36
18. Hasanov, MI, Rudniev, OV, Kotliar, OV, Titarenko, OV & Kulina, DV 2025, 'Doslidzhennia vplyvu zernystosti almaznykh kruhiv na pokaznyky shlifuvannia' [Investigation of the influence of diamond wheel grain size on grinding performance], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 1 (11), Pp. 117–127. DOI: https://doi.org/10.20998/2079-004X.2025.1(11).14
19. Polianskyi, VI 2019, 'Zakonomirnosti formuvannia i znyzhennia temperatury rizannia pry mekhanichnii obrobtsi' [Patterns of formation and reduction of cutting temperature at machining], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, iss. 39, Pp. 119–126. DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019.201065 (in Ukraine)

Submission received: 10/19/2025 Accepted: 11/20/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-03
УДК 629.423.1

[1]С. В. БІРЮКОВ,
аспірант кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском
e-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6403-5880
[1]С. О. ГУБСЬКИЙ, кандидат технічних наук
доцент кафедри комп'ютерного моделювання та інтегрованих технологій обробки тиском
e-mail: gubskiyso@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7797-9139
[1]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002, Україна

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ВІТЧИЗНЯНИХ ВІЗКІВ ВАГОНІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ В КОНТЕКСТІ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ВАГОНОБУДУВАННЯ

У статті розглядаються конструкції візків вагонів електрорухомого складу, які експлуатуються на вітчизняних метрополітенах. Розглянуто основні складові частини візків різних типів: моделей старої конструкції, що експлуатуються на Харківському метрополітені та більш сучасних, які виробляються на ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» та експлуатуються на вагонах столичного метро. Відповідно до проведеного аналізу вказано на особливості конструкції сучасних візків, серед них варто виділити застосування листової рами, що підвищило міцність та надійність конструкції. Важливим кроком уперед стало впровадження асинхронного тягового привода, який забезпечує кращі тягові характеристики та енергоефективність. Системи безпеки покращилися завдяки використанню дискового гальма, а комфорт пасажирів значною мірою зріс завдяки пневматичним ресорам у центральному підвішуванні.

Також проаналізовано різні технічні рішення, що застосовуються в конструкції візків рухомого складу закордонних метрополітенів, насамперед ті, що відрізняються від класичного бачення ходової частини рухомого складу – наприклад, застосування нетрадиційних матеріалів, а саме - вуглецевого волокна, у несучій конструкції візка або застосування коліс із гумовими шинами замість традиційних сталевих.

У статті проведено порівняння основних експлуатаційних характеристик вітчизняних візків та закордонного аналога фірми Siemens, що має схожу конструкцію. Вказується на перспективність конструкції сучасних візків в плані підвищення безпеки руху, економічності та комфортності перевезень, а також на необхідність розвитку вітчизняного вагонобудування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *метрополітен, візок вагону, аналіз конструкції, рама візка, вуглецеве волокно, шинний хід, пневматичні ресори.*

Як цитувати: Бірюков С. В., Губський С. О. Аналіз конструкції вітчизняних візків вагонів метрополітену в контексті сучасних тенденцій розвитку вагонобудування. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 26-37. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-03

Вступ

Важливою частиною конструкції будь якого вагону метрополітену є візок, який не тільки сприймає на себе вагу кузова та рівномірно розподіляє її на колію, а й передає тягові та гальмівні зусилля на раму кузова під час руху вагону. Саме візки забезпечують безпечне та плавне пересування вагону вздовж залізничної колії. Тому конструкція візка повинна відповідати всім технічним вимогам для безпечної експлуатації рухомого складу [1].

Конструкція візка, що експлуатується на рухомому складі метрополітену може залежати від:

© Бірюков С. В., Губський С. О. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

- типу вагону – моторний або безмоторний;
- моделі вагону - більш сучасні вагони зазвичай мають більш досконалу конструкцію візків;
- виробника візків – кожен виробник має власні напрацювання та погляди на конструкцію;
- технічних вимог конкретного метрополітену, що продиктовані зокрема шириною колії, яка може відрізнятися в різних країнах, мінімальним радіусом кривих ділянок колії.

Візок має складну конструкцію, яка постійно вдосконалюється, адже, як і всякий механізм, він має «слабкі місця», що виявляються під час експлуатації.

Мета роботи – проаналізувати конструкції існуючих моделей візків вагонів закордонних метрополітенів та порівняти їх із візками, що експлуатуються на вітчизняному рухомому складі.

Аналіз конструкції вітчизняних візків рухомого складу метрополітену

Візки вагонів, що застосовуються на вітчизняних метрополітенах, зокрема на КП «Харківський метрополітен», двовісні, обертальні, шарнірно з'єднані з кузовом вагону, що дозволяє йому обертатися в горизонтальній площині під час руху електропоїзду. Візок складається з таких основних вузлів: рама з кронштейнами, колісні пари [2] з буксами, тягові електродвигуни та редуктори, подвійне ресорне підвішування, струмоприймачі та деталі гальмівної важільної передачі.

На Харківському метрополітені експлуатується два типи візків: повідцевий та шпинтонний, які відрізняються конструкцією буксового вузла. Причому конструкція шпинтонного візка є наслідком модернізації повідцевого [3]. Ця модернізація була пов'язана з підвищенням надійності вузла зв'язку колісної пари з рамою візка. Необхідність даного вдосконалення була обумовлена дефіцитом візків для рухомого складу у другій половині 80-х років, коли інтенсивно будувалися та розвивалися вітчизняні метрополітени. Зокрема ставилася задача модернізації без суттєвої зміни конструкції візка, виробництво якого було вже налагоджено раніше. При вдосконаленні повідцевого візка на заводі виробнику вирішили відмовитись від повідцевого зв'язку буксового вузла з рамою візка на користь шпинтонного з'єднання, зокрема через велику схильність до тріщеноутворення повідцевого кронштейну візка при експлуатації [4, 5].

Повідцевий тип візка (рис. 1) встановлено на вагонах серії Еж - 3 та Ем – 508Т (використовується тільки як проміжний вагон), та на вагонах 81-717 та 81-714.

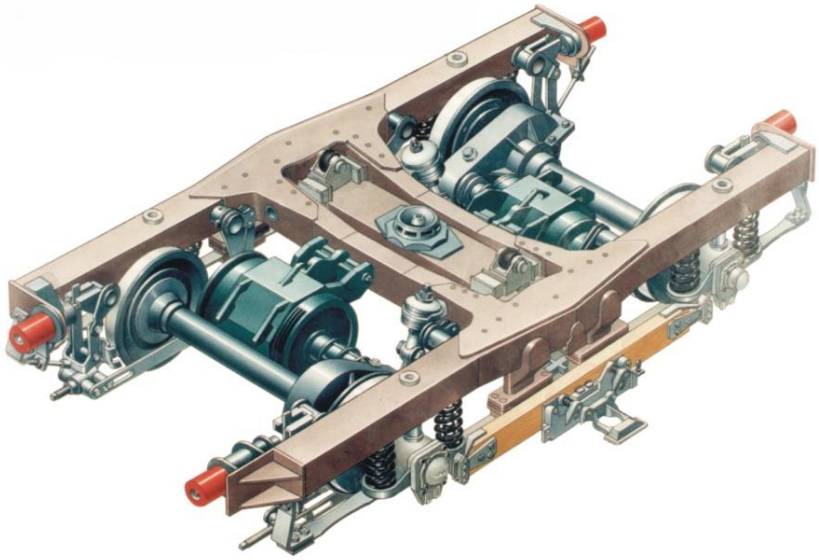

Рис. 1 – Повідцевий візок вагону електропоїзду метрополітена.
Fig. 1 – Bogie of an electric subway carriage.

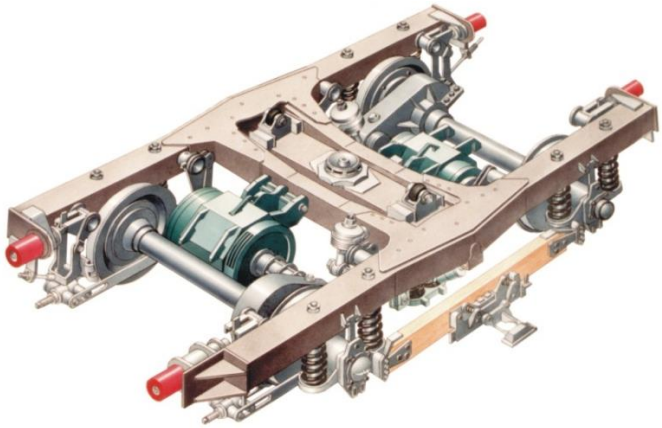

Рис. 2 – Шпинтонний візок.
Fig. 2 – Spindle bogie.

Шпинтонний тип візка (рис. 2) експлуатується на серії вагонів 81-717.5 (головний вагон) та 81-714.5 (проміжний вагон), які серійно почали виготовлятися у 1989 році, а також на їх модифікаціях. Також цей тип візків використовується на вагонах 81-718, 81-719 «ТІСУ» та на новому рухомому складі виробництва ПАТ "Крюківський вагонобудівний завод" моделі 81-7036, 81-7037, що експлуатується на Харківському метрополітені.

Одним із найважливіших елементів кожного візка є рама. Рами візків підтримують кузов та за допомогою центрального та буксового підвішування передають масу вагону на колісні пари. Обертальний момент, що розвивається тяговим електродвигуном, передається через карданну муфту на редуктор і далі на колісну пару, яка, в свою чергу, передає тягове зусилля через букси до рами. Від рами візка сумарні тягові зусилля від двох колісних пар передаються на раму вагона та далі на автозчеплення. Відповідно, основним призначенням рам візків є передача та розподіл вертикального навантаження між колісними парами та сприйняття тягових зусиль, що розвивається колісними парами.

Конструкції візків повідцевого та шпинтонного типу мають зварні Н-подібні рами без кінцевих балок, виготовлені з листової сталі товщиною 10 мм.

Основу рами візка складають дві поздовжні та дві поперечні балки. Поздовжні балки з'єднані з колісними парами через буксове підвішування та повідці або шпинтони, що відрізняє повідцевий тип візка від шпинтонного. Поперечні балки забезпечують зв'язок між поздовжніми балками та слугують для кріплення тягових електродвигунів, центрального підвішування та редукторів.

Буксове підвішування на обох типах візків – безщелепне [6], що покращує плавність руху вагону та знижує додаткові навантаження, що передаються рамі візка. На повідцевому візку кожну буксу колісної пари закріплюють трьома повідцями (рис. 3) до повздовжньої балки рами візка. Застосовують два прямих та один вигнутий повідець, які виконані із ресорної сталі. Саме через повідці відбувається передача тягових та гальмівних зусиль від колісної пари на раму візка.

Шпинтонне буксове підвішування (рис. 4) складається з двох однорядних циліндричних пружин, встановлених через підкладки на крилах букси та двох шпинтонів, що запресовані в раму візка.

Тягові електродвигуни постійного струму, які застосовуються на вагонах серії Е мають меншу потужність у порівнянні з двигунами постійного струму вагонів 81 серії: 72 кВт та 115 кВт відповідно. Це зумовило деякі конструкційні особливості візків, які експлуатуються на даних рухомих складах. На вагонах Е застосовується повідцевий візок із три точковим кріпленням електродвигуна до поперечної балки рами візка, на вагонах 81 – 717/714 – повідцевий візок, але через більш потужний двигун застосовується реактивна тяга [4], яка виступає третьою точкою кріплення у підвісці двигуна та знижує навантаження від його обертального моменту на поперечну балку рами візка. На вагонах серії 81 - 717.5/714.5 також застосована реактивна тяга, але візки вже шпинтонні.

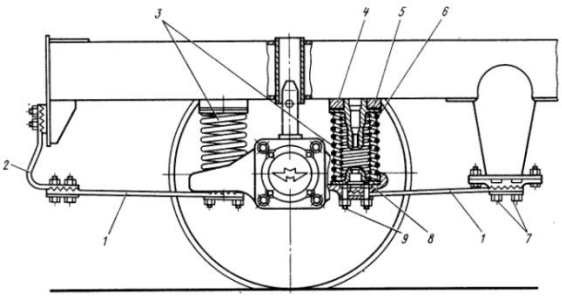

Рис. 3 – Буксове підвішування повідцевого візка: 1 – прямий повідець, 2 – вигнутий повідець, 3 – циліндричні пружини, 4 – гумова підкладка, 5 – регулювальна підкладка, 6 – верхня опора, 7 – кронштейн рами, 8 нижня опора, 9 – деталі кріплення.

Fig. 3 - Axle box suspension of the leash trolley: 1 - straight leash, 2 - curved leash, 3 - cylindrical springs, 4 - rubber pad, 5 - adjustment pad, 6 - upper support, 7 - frame bracket, 8 - lower support, 9 - fastening parts.

Рис. 4 – Буксове підвішування шпинтонного візка.

Fig. 4 - Axlebar suspension of the spindle carriage.

На візках вагонів метрополітену застосовується двохступінчасте ресорне підвішування [7] – центральне та буксове, яке слугує для забезпечення плавного та безпечного руху електропоїзда, а також для передачі навантаження від ваги вагону та розподілення її між колісними парами. В якості пружного елемента в ресорному підвішування застосовано дворядні циліндричні пружини.

Всі візки вагонів обладнано пневматичним колодковим гальмом із двостороннім натисненням колодок на бандаж колісної пари. Гальмівне обладнання вагону серії Е складається з пневматичного та ручного приводів та гальмівної важільної передачі. Візки 81-717, 81-714 та їх модифікацій замість ручного гальма мають стоянковий пневмопружинний, який разом із гальмівним циліндром поєднано у блок-гальмо.

З викладеного вище матеріалу видно, що візки, сконструйовані у 70-х та 80-х роках минулого сторіччя мають вже морально застарілу конструкцію, хоча постійно проходять через певні модернізації. Зокрема на ПАТ "Крюківський вагонобудівний завод" із застосуванням сучасних методів та матеріалів виробляються візки шпинтонного типу для вагонів метрополітену (модель візка 68-797, тип 1-7) [8].

Але на цьому заводі виробництво налагоджено також і для більш сучасної моделі візка – 68-7054 (рис. 5), який має більш прогресивну конструкцію та експлуатується на рухомому складі Київського метрополітену.

Рис. 5 - Візок моторний моделі 68-7054 з пневмопідвішуванням та дисковими гальмами.
Fig. 5 - Motor bogie model 68-7054 with pneumatic suspension and disc brakes.

Цей візок має ті ж самі основні вузли, що й візки повідцевого та шпинтонного типу, але значною мірою відрізняється за конструкцією цих вузлів:

- тяговий привід на основі асинхронного двигуна, на відміну від двигунів постійного струму послідовного збудження, що застосовані на старих візках. Також цей асинхронний двигун має більшу потужність;
- рама візка має зварну листову конструкцію та вигини поздовжніх балок по центру в горизонтальній площині, на старих візках рами зварені зі швелерів. Листова конструкція рами є більш технологічною, оскільки дозволяє знизити об'єми ручного зварювання та підвищити автоматичне, що позитивно відображається на автоматизації виробництва;
- вага моторного візка складає 7300 кг, що є легшим в порівнянні зі шпинтонним типом, вага якого 7500 кг;
- візок обладнаний дисковим гальмом з елементами протиюзової системи, на відміну від колодкового гальма на старих моделях візків;
- центральне ресорне підвішування виконано на основі пневматичних ресор [9], на шпинтонних та повідцевих візках центральне підвішування пружинне;
- застосована зубчаста муфта для з'єднання валів тягового двигуна та малої шестерні редуктора, на відміну від карданної муфти на старих візках, яка є досить проблемним вузлом та потребує ретельного догляду та обслуговування;
- на візку є система автоматизованого дозованого змащування рідиною гребенів коліс, тим часом коли на старих застосовано механічні рейкозмащувачі. Такі заходи зменшують зношення колісних пар при експлуатації.

Таким чином візок моделі 68-7054 відповідає сучасним світовим концепціям та інноваційним рішенням конструювання ходових частин вагону та складає гідну конкуренцію закордонним аналогам, що експлуатуються на метрополітенах інших країн.

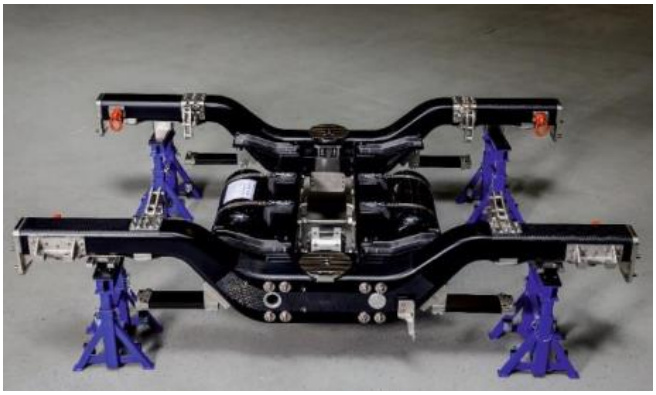

Рис. 6 – Прототип рами візка з вуглепластику.
Fig. 6 - Prototype of the bogie frame made of carbon fibre.

Сучасні візки вагонів, що експлуатуються на закордонних метрополітенах

На світовому ринку існує багато провідних компаній, які мають значний досвід у виробництві візків для вагонів метрополітену. Найвідоміші серед них: Alstom (Франція), Siemens Mobility (Німеччина), Hitachi Rail (Японія/Італія), CAF (Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles) (Іспанія), Hyundai Rotem (Південна Корея), CRRC (Китай), Bombardier Transportation (Канада/Франція) (тепер частина Alstom), Stadler Rail (Швейцарія). CRRC - найбільший виробник рухомого складу у світі, який також є значним постачальником візків для метрополітенів як в Китаї, так і за його межами.

Одним із сучасних напрямів удосконалення конструкції візка є зменшення його маси. Застосування композитних матеріалів на основі вуглецевого волокна відкриває нові можливості для полегшення компонентів візка в порівнянні з традиційним виконанням їх із металів, зокрема сталі або алюмінію. Зменшення маси рухомого складу призводить до зменшення споживання електроенергії, а також до зменшення зносу рейкової колії. Тому таке технічне рішення має великі перспективи у впровадженні на залізницях та метрополітенах [10, 11]. Зокрема з вуглецевого волокна вже реалізовані та випробувані такі елементи, як кузов вагону, рама візка (рис. 6), обшивка під підлогою вагону, платформа пантографу високошвидкісного потягу.

Після випробувань на статичні та циклічні навантаження на рамі візка з вуглепластику не було виявлено критичних пошкоджень, що підтверджує надійність конструкції. Доречі, рама з вуглецевого волокна має на 50% меншу вагу ніж аналогічна рама у сталевому виконанні [12].

Слід наголосити, що витрати на виробництво вуглепластикових рам вище, ніж у сталевих, але ці кошти згодом амортизуються за рахунок менших експлуатаційних витрат [13].

Такі візки з вуглецевого волокна експлуатуються на поїзді CETROVO 1.0 (рис. 7), який спільно розроблений китайською корпорацією CRRC та Qingdao Metro Group. Він був введений в експлуатацію на першій лінії метро Циндао в січні 2025 року та є першим в світі поїздом, де використані композитні матеріали з вуглецевого волокна в основних несучих конструкціях. Це дозволило зробити на 25% легший кузов, на 50% легший візок (рис. 8) у порівнянні з металевими аналогами. Загальна вага поїзда зменшилася на 11%, що дозволило зменшити експлуатаційне енергоспоживання на 7%.

Прикладом сучасної концепції ходової частини вагону метрополітену є візок моделі SF2000 (рис. 9) виробництва Siemens Mobility [14], що експлуатується на рухомому складі Тайбейського метрополітену (Тайвань) та метрополітені Бангкоку (Таїланд) є гарним зразком надійної та ефективної в експлуатації конструкції. Цей візок двовісний, виробляється у моторному або немоторному виконанні, причому обидві конструкції ідентичні, відрізняються лише відсутністю тягового приводу на немоторному візку, що значно спрощує обслуговування та ремонт, адже запасні частини взаємозамінні. Візки мають двоступеневе підвішування: буксове підвішування реалізовано за допомогою конічних ламінованих пружніх металогумових елементів, які також виконують функції осьового направлення, центральне підвішування виконано за допомогою пневматичних ресор, що забезпечують високий рівень комфорту та підтримують постійну висоту підлоги вагону незалежно від навантаження в салоні. На моторних візках встановлено трифазні асинхронні двигуни, які передають обертальний момент на колісні пари через малошумний редуктор, який з’єднаний із двигуном за допомогою пружньої муфти. Така конструкція дозволяє замінювати колісну пару та редуктор без демонтажу електродвигуна. Ефективне гальмування забезпечується дисковим гальмом на кожне колесо та має низький рівень шуму. Для полегшення обслуговування гальмівні блоки розташовані з зовнішньої сторони візка. Також використовується рекуперативне гальмування, якщо така система присутня на поїзді.

Рис. 7 – Поїзд метро з вуглецевого волокна CETROVO 1.0.
Fig. 7 - The CETROVO 1.0 carbon fibre subway train.

Цікавою також є концепція візка на шинному ходу, які застосовуються на рухомому складі моделі MP 14 (рис. 10) у метрополітені Парижа. Ці візки розроблені компанією Alstom, яка є однією зі світових лідерів з виробництва залізничного транспорту. На Паризькому метрополітені є лінії з шинним ходом, де і застосовуються ці візки, на яких замість сталевих коліс використовуються пневматичні шини для руху по спеціальних коліях. Така конструктція візка (рис. 11) забезпечує краще зчеплення коліс, що дозволяє швидше розганятися та гальмувати, а також долати крутіші підйоми та криві ділянки колії. Сталеві колеса на таких візках використовуються в якості допоміжних, для направлення та утримання вагону на рейках. Також застосовані горизонтальні напрямні колеса для додаткової стабільності та точнішого ведення поїзда по напрямних рейках. Ці візки мають менший рівень шуму, адже гумові шини значно тихіші за сталеві колеса. Як наслідок застосування пневматичних шин є зменшення зносу колії та коліс.

Виходячи з аналізу вітчизняних та світових тенденцій на сучасні конструкції візків для рухомого складу метрополітену можливо скласти порівняльну таблицю, що складається з основних параметрів, які характеризують візки. Для порівняння буде проаналізовано параметри візків шпинтонного типу моделі 68-797, які експлуатуються на Харківському метрополітені, візків виробництва КВБЗ моделі 68-7054, що експлуатуються на Київському метрополітені та візки моделі SF2000 від Siemens Mobility, метрополітенів Тайваню та Таїланду. Цю інформацію зведено до таблиці.

Рис. 8 – Візок із несучою рамою з вуглецевого волокна.
Fig. 8 - The bogie has a carbon fibre support frame.

Рис. 9 – Візок SF2000.
Fig. 9 – The SF2000 bogie.

Рис. 10 – Рухомий склад Паризького метрополітену на шинному ходу.
Fig. 10 - Rolling stock of the Paris Metro on tyres.

Рис. 11 – Візок поїзда MP 14.
Fig. 11 - The bogie of MP 14 train.

Таблиця
Порівняння вітчизняних та закордонних візків
Table
Comparison of domestic and foreign bogies

Параметр	Візок мод. 68-797 (шпинтонний)	Візок мод. 68-7054 (КВБЗ)	SF2000 (Siemens Mobility)
Маса візка, кг	7500	Моторний 7300 Немоторний 5150	Моторний 7500 Немоторний 5500
Конструкційна швидкість, км/год.	90	90 або 100	80
Ширина колії, мм	1520	1520	1435
Ресорне підвішування	Двохступінчасте, пружинне	Буксове – пружинне, центральне - пневматичне	Буксове – пружинне, центральне - пневматичне
Колісна база, мм	2100	2100	2300
Діаметр колеса, мм	780	860	850
Навантаження на вісь, тс	15	15	16.2
Потужність тягового двигуна, кВт	110	150-180	230
Гальмівна передача	колодочна	дискова	дискова

Висновки

Візки, що експлуатуються на рухомому складі Харківського метрополітену мають застарілу конструкцію, що впливає на вартість обслуговування та ремонту. В результаті порівняння цих візків із сучасними можна виділити такі особливості:

- на сучасних візках широко застосовуються передові матеріали, які можуть відрізнятися від традиційних та використовується комп'ютерне моделювання при проектуванні конструкції [15, 16];
- рама візка має іншу геометричну конфігурацію, збільшений термін служби (до 40 років для візка моделі 68-7054) та є більш технологічною у виробництві;
- застосування тягового приводу змінного струму та більшої потужності;
- дискове гальмо є більш ефективним в порівнянні з колодочним;
- застосування пневматичного ресорного підвішування підвищує рівень комфорту для пасажирів завдяки кращій амортизації та плавності ходу;
- сучасна система моніторингу стану візка за допомогою датчиків підвищує безпеку його експлуатації;
- покращення характеристик шумо та віброізоляції позитивно відображається на комфорті перевезення та навколишньому середовищі.

В Україні є власне виробництво візків для вагонів метрополітену, які відповідають сучасним стандартам якості та мають конкурентоспроможну конструкцію в порівнянні із конструкціями візків закордонних аналогів, що дозволяє не тільки забезпечувати потреби внутрішнього ринку, а і підвищити технологічну незалежність країни.

Тож подальша робота з удосконалення конструкції та технології виробництва елементів ходової частини рухомого складу метрополітену є перспективною та актуальною у вітчизняній галузі транспортного машинобудування, зокрема у вагонобудуванні.

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. Правила технічної експлуатації метрополітенів України. Харків, 2015. 304 с.
2. Колісні пари вагонів магістральних залізниць колії 1520 (1524) мм (конструкція, технічне обслуговування та ремонт) : підручник / С. В. Панченко, А. О. Каграманян, І. Е. Мартинов та ін. ; за заг. ред. С. В. Панченка. Харків : УкрДУЗТ, 2018. 367 с.
3. Дворецький В. І., Демченко Ю. В., Явдощина О. Ф., Федоренко В. І. Технологія відновлювального ремонту і модернізації рам візків вагонів метрополітену. Наука та інновації. 2007. Т 3. №2. С. 27-33. URL: http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2007/N2/Dvorecjkyj.pdf.
4. Артеменко А. В., Чепурненко И. В., Мазанько Д. Г. Анализ повреждений рам тележек вагонов метрополитена. Збірник наукових праць ДП «УкрНДІВ». Рейковий рухомий склад. 2012. Вип. 6. С. 29-33.
5. Атлас М. В., Донченко А. В., Водянніков Ю. Я., Шелейко Т. В. Дослідження конструкції рами візка вагона метрополітену з метою визначення надійності її елементів. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2010. Вип. 31. С. 7-10.
6. Кузова, візки, колісні пари та буксові вузли локомотивів: конспект лекцій. Ч. 3. Механічна частина ТРС / Д. О. Аулін, О. В. Клименко, Д. М. Коваленко, М. В. Максимов. Харків: УкрДУЗТ, 2022. 46 с.
7. Навчальний посібник по вивченню улаштування та роботи електричного, пневматичного та механічного обладнання вагонів метрополітену серії 81 - 717 та 81 – 714. КП «Київський метрополітен». Київ, 2005. 60 с.
8. Каталог. Крюківський вагонобудівний завод. URL: https://kvsz.com/images/stories/doc/albom_teh_vozm_tsn2024ua.pdf (дата звернення 11.05.2025).
9. Liubarskyi B., Petrenko O., Lakunin D., Nikonov O., Matsyi O. Building a mathematical model of the oscillations in subway cars equipped with electromechanical shock absorbers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 6. Pp. 51-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217183 (дата звернення 17.09.2025).
10. Ulbricht A., Zeidler F., Renner S., Bilkenroth F., Günter S. Novel composite design approaches for structural lightweight components of railway vehicles - development, technological realization and test. Civil-Comp Conferences, Volume 1, Paper 32.5. 2022. DOI: 10.4203/ccc.1.32.5 (дата звернення 17.09.2025).
11. Bilkenroth F., Ramisch P., Yunlai Li, Ulbricht A. Enhancing Rail Vehicle Structural Performance Through High-Recyclability Thermoplastic Composite Lightweight Components. Materials. 2023. Vol.11. Article 3948.
12. Ulbricht A. Rail Vehicle in CFRP-intensive Design. Lightweight Design Worldwide. 2019. Vol. 12. Pp. 36-41.
13. Ulbricht A., Zeidler F., Bilkenroth F., Soltysiak S. Structural lightweight components for energy – efficient rail vehicles using high performance composite materials. Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 72. Pp. 1685-1692. DOI: **10.1016/j.trpro.2023.11.641** (дата звернення 17.09.2025).
14. Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf (дата звернення 17.09.2025).
15. Cascino A., Meli E., Rindi A. A new strategy for railway bogie frame designing combining structural-topological optimization and sensitivity analysis. Vehicles. 2024. Vol 6. Pp. 651-665. URL: https://doi.org/10.3390/vehicles6020030 (дата звернення 17.09.2025).

16. Zhou, W., Zhang, G., Wang, H., Peng, C., Liu, X., Xiao, H., Liang, X. Experimental Fatigue Evaluation of Bogie Frames on Metro Trains. Machines. 2022. Vol. 10. 1003. URL: https://doi.org/10.3390/machines10111003 (дата звернення 17.09.2025).

Отримано: 14.08.2025 Прийнято: 17.09.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1] BIRIUKOV S.,
Postgraduate student of the Computer modelling and integrated pressure processing technologies Department
e-mail: Serhii.Biriukov@mit.khpi.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6403-5880
[1] HUBSKYI S., Ph. D.,
Associate Professor of the Computer modelling and integrated pressure processing technologies Department
e-mail: gubskiyso@gmail.com ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7797-9139
[1]*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*
Kyrpichova St., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE DESIGN OF DOMESTIC UNDERGROUND CARRIAGE BOGIES IN THE CONTEXT OF MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CARRIAGE BUILDING

The article deals with the design of bogies for electric rolling stock cars operated on domestic subways. The main components of bogies of different types are considered: models of the old design, which are used in the Kharkiv subway, and more modern ones, which are produced at PJSC 'Kryukiv Carriage Works' and are used on the cars of the capital's subway. According to the analysis, the design features of modern trolleys were identified, including the use of a sheet metal frame, which increased the strength and reliability of the structure. An important step forward was the introduction of an asynchronous traction drive, which provides better traction characteristics and energy efficiency. Safety systems have been improved by the use of a disc brake, and passenger comfort has been greatly enhanced by the use of air springs in the central suspension.

The paper also analyses various technical solutions used in the design of bogies in foreign subways, primarily those that differ from the classical vision of the rolling stock chassis, such as the use of non-traditional materials, such as carbon fibre, in the bogie's bearing structure or the use of wheels with rubber tyres instead of traditional steel ones.

The article compares the main operational characteristics of domestic bogies and a foreign analogue of Siemens, which has a similar design. It is pointed out that the design of modern bogies is promising in terms of improving traffic safety, efficiency and comfort of transportation, as well as the need to develop domestic car building.

KEYWORDS: *underground, car bogie, structural analysis, bogie frame, carbon fibre, tyre travel, pneumatic springs.*

In cites: Biriukov S., Hubskyi S. (2025), Analysis of the design of domestic underground carriage bogies in the context of modern trends in the development of carriage building. *Engineering, (36),* 26-37. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-03 (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.

References

1 *Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii metropoliteniv* [Rules for the technical operation of subways in Ukraine], 2015. Kharkiv. (in Ukraine)
2. Panchenko S. V., Kahramanian A. O. and Martynov I. E., 2018. *Kolisni pary vahoniv mahistralnykh zaliznyts kolii 1520 (1524) mm (konstruktsiia, tekhnichne obsluhovuvannia ta remont)* [Wheelsets of

1520 (1524) mm gauge mainline railways (construction, maintenance and repair)].Kharkiv: UkrDUZT. (in Ukraine)

3. Dvoretskyi V. I., Demchenko Yu. V., Yavdoshchyna O. F., Fedorenko V. I. Technology for the restorative repair and modernisation of metro carriage frames. *Nauka ta innovatsii.* [online] Vol. 3, no. 2. Available at: <http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2007/N2/Dvorecjkyj.pdf> [Accessed 17 September 2025].
4. Artemenko A. V., Chepurnenko Y. V. and Mazanko D. H., 2012. Analyz povrezhdenyi ram telezhek vahonov metropolytena. [Analysis of damage to bogie frames of metro cars]. *Zbirnyk naukovykh prats DP «UkrNDIV»,* issue 6, pp. 29-33. (in Ukraine)
5. Atlas M. V., Donchenko A. V., Vodiannikov Yu. Ya. and Sheleiko T. V., 2010. Doslidzhennia konstruktsii ramy vizka vahona metropolitenu z metoiu vyznachennia nadiinosti yii elementiv. [Study of the subway carriage frame structure to determine the reliability of its elements]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana,* issue 31, pp. 7-10. (in Ukraine)
6. Aulin D. O., Klymenko O. V., Kovalenko D. M. and Maksymov M. V., 2022. *Kuzova, vizky, kolisni pary ta buksovi vuzly lokomotyviv: konspekt lektsii. Ch. 3. Mekhanichna chastyna TRS* [Locomotive bodies, bogies, wheelsets and axle assemblies: lecture notes. P. 3. Mechanical part of the rolling stock]. Kharkiv: UkrDUZT. Available at: < http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/9244/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9.pdf > [Accessed 11 May 2025].
7. *Navchalnyi posibnyk po vyvchenniu ulashtuvannia ta roboty elektrychnoho, pnevmatychnoho ta mekhanichnoho obladnannia vahoniv metropolitenu serii 81 - 717 ta 81 – 714.* [A textbook for studying the arrangement and operation of electrical, pneumatic and mechanical equipment of subway cars of the 81-717 and 81-714 series.], 2005. Kyiv. (in Ukraine)
8. *Catalogue. Kryukiv Carriage Works.* Available at: < https://kvsz.com/images/stories/doc/albom_teh_vozm_tsn2024ua.pdf > [Accessed 15 May 2025].
9. Liubarskyi B., Petrenko O., Lakunin D., Nikonov O. and Matsyi O. Building a mathematical model of the oscillations in subway cars equipped with electromechanical shock absorbers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2020. Vol. 6. Pp. 51-59. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.217183 [Accessed 17 September2025].
10. Ulbricht A., Zeidler F., Renner S., Bilkenroth F. and Günter S. *Novel composite design approaches for structural lightweight components of railway vehicles - development, technological realization and test.* Civil-Comp Conferences, Volume 1, Paper 32.5. 2022. DOI: https://doi.org/10.4203/ccc.1.32.5 [Accessed 17 September2025].
11. Bilkenroth F., Ramisch P., Yunlai Li, and Ulbricht A. Enhancing Rail Vehicle Structural Performance Through High-Recyclability Thermoplastic Composite Lightweight Components. *Materials*. 2023. Vol.11. Article 3948.
12. Ulbricht A. Rail Vehicle in CFRP-intensive Design. *Lightweight Design Worldwide*. 2019. Vol. 12. Pp. 36-41.
13. Ulbricht A., Zeidler F., Bilkenroth F. and Soltysiak S. Structural lightweight components for energy – efficient rail vehicles using high performance composite materials. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. Pp. 1685-1692. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.641 [Accessed 17 September 2025].
14. *Siemens Mobility. Portfolio. Rolling stock components. Bogies. Data sheet bogie SF2000*. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2aafa39-b547-4f53-a5af-03aee90ea6f2/mobility-datasheet-bogies-sf2000-en.pdf [Accessed 17 September 2025].
15. Cascino A., Meli E. and Rindi A. A new strategy for railway bogie frame designing combining structural-topological optimization and sensitivity analysis. *Vehicles*. 2024. Vol 6. Pp. 651-665. URL: https://doi.org/10.3390/vehicles6020030 [Accessed 17 September2025].
16. Zhou, W., Zhang, G., Wang, H., Peng, C., Liu, X., Xiao, H. and Liang, X. Experimental Fatigue Evaluation of Bogie Frames on Metro Trains. *Machines*. 2022. Vol. 10. 1003. URL: https://doi.org/10.3390/machines10111003 [Accessed 17 September2025].

Submission received: 08/14/2025 Accepted: 09/17/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-04
УДК . 621. 87

[1] **СУПОНЄВ 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
[1] **РОЗЕНФЕЛЬД М.В.,** старший викладач кафедри
будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова
e-mail: kr426571@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6397-7319
[1] **НАВОЛОКОВ В.В.,** аспірант кафедри
експлуатації, випробувань, сервісу будівельних і дорожніх машин
e-mail: slaviknavolokov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0258-1397
[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] *Харківський національний автомобільно-дорожній університет*
вул. Ярослава Мудрого 25, м. Харків, 61002

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА БЕЗТРАНШЕЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті наведено аналіз сучасних безтраншейних технологій будівництва комунікаційних мереж, до яких належать трубопроводи для постачання води та енергоносіїв, електричні кабелі та кабелі зв'язку. Оскільки безтраншейне прокладання комунікацій полягає у створенні порожнини в ґрунті, то були розглянуті відповідні технічні засоби та процеси, які при цьому відбуваються.

У зв'язку з тим, що метою екологічної експертизи проектів виробництва робіт є мінімізація антропогенного та технічного впливу на довкілля, збереження та покращення їх властивості заради здоров'я людини метою статті було виявлення особливостей цих технологій саме з точки зору екологічної безпеки. У роботі були проаналізовані діючі нормативи та вимоги екологічної безпеки по кожному об'єкту стандартизації окремо. А саме: охорона водних ресурсів, охорона повітряного басейну, охорона якості та властивості ґрунтів.

Враховуючи, що земляні роботи пов'язані зі значною втратою врожайності сільськогосподарських культур, то додатково була дана оцінка впливу на неї процесів структурних змін ґрунту при створенні скважин у ґрунті шляхом його радіального ущільнення. Зроблені відповідні висновки та практичні рекомендації для безтраншейного прокладання підземних комунікацій.

Тенденції розвитку сучасних технологій будівництва йде шляхом безтраншейних методів ведення будівельних робіт, які мають свої особливості та вплив на екологічну безпеку довкілля. Розглядання сучасних безтраншейних технологій з точки зору екологічної безпеки навколишнього середовища є актуальним питанням.

***КЛЮЧОВІ СЛОВА*:** розподільні трубопроводи, газопроводи, нафтопроводи, земляні роботи, реконструкція трубопроводів, техногенні катастрофи, надійність постачання енергоносіїв, екологічна безпека, навколишнє середовище.

Як цитувати: Супонєв В.М., Рагулін В.М., Розенфельд М.В., Наволоков В.В., Лемець О.О. (2025). Екологічна безпека безтраншейних технологій. Машнобудування. 2025. Вип. 36 С. 38-50. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-04

© Супонєв В.М., Рагулін В.М., Розенфельд М.В., Наволоков В.В., Лемець О.О. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

На сьогоднішній день в Україні перебувають в експлуатації десятки тисяч кілометрів магістральних та розподільчих трубопроводів різного призначення. Як правило, свого часу вони були виготовлені зі сталевих труб, на які гарантійний термін служби при підземній схемі будівництва складає 25 років. Якщо врахувати, що активне будівництво газо-, нафто-, водо- та продуктопроводів припадає на 60-ті та 70-ті роки, то можна припустити, що фізичне зношування багатьох з них уже досягло свого критичного стану. Надійність роботи після цього різко падає, а ризик аварій зростає. Витоку транспортованого середовища при цьому призводять не тільки до великих економічних втрат, а й наносять вред довкіллю. Особливо якщо йдеться про транспортування нафти, аміаку, газу та води. Встановлено [1], що продовження терміну експлуатації трубопроводів після гарантійного може бути збільшено до 40-50 років шляхом їхнього капітального ремонту, якщо стан труби залишається задовільним. Однак цей період обмежений. Згодом економічні витрати будуть такими, що доцільніше просто збудувати новий трубопровід.

Аналіз технічного стану трубопровідних мереж

Аналіз технічної інформації та офіціальних даних показав, що Україна має одну з найрозвиненіших трубопровідних транспортних систем енергоносіїв у світі. Нафтотранспортна система України за даними АТ «Укртранснафта» має загальну протяжність понад 4766 км та побудована з трубопроводів діаметром 219 мм…1220 мм.

Гарантійний термін безпечної експлуатації нафтопроводів, залежно від їх типу та ізоляційного покриття, становить 25…33 роки. Наразі вони на 90 % відпрацювали свій амортизаційний рядок [1], що підтверджує термін фактичної експлуатації трубопроводів за роками рис.1 [2, 3]. Технічний стан нафтопроводів України є вкрай незадовільним, а їхня лінійна частина трубопроводів підтримується у працездатному стані лише завдяки виконанню ремонтних робіт на ділянках, які потребують невідкладного відновлення.

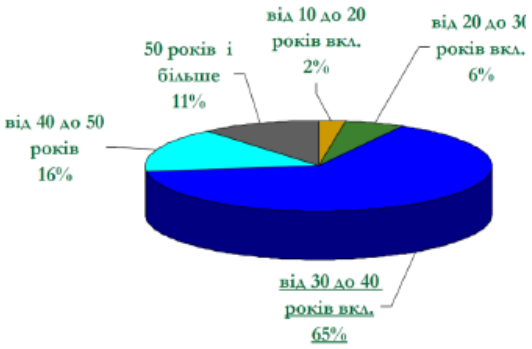

Рис. 1 – Термін експлуатації нафтопроводів
Fig. 1 – Lifespan of oil pipelines

Газотранспортна система (ГТС) країни, згідно з даними ПАТ«Укртрансгаз», на цей час складає понад 35710 км різного діаметру. Але поточний стан ГТС України (див. рис. 2) [4], внаслідок загальних кризових явищ у країні та в Європі, також є вкрай незадовільним. У більшості трубопроводів необхідно замінити ізоляційне покриття, покращити засоби захисту від корозії, а на деяких ділянках повністю замінити зношений трубопровід на новий.

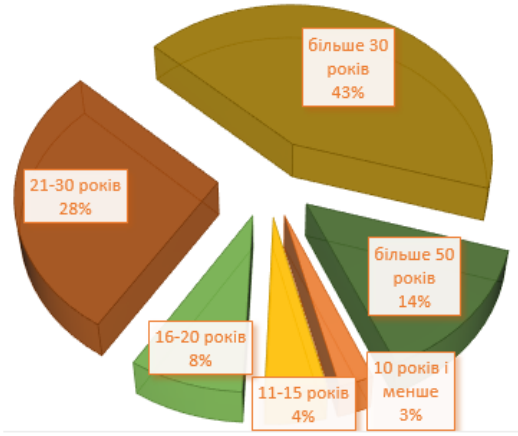

Рис. 2 – Термін експлуатації газопроводів
Fig. 2 – Lifespan of gas pipelines

На сьогоднішній день 43 % газопроводів відпрацювали вже свій амортизаційний ресурс та майже 57 % знаходяться в експлуатації понад 30 років, що є критичною межею їх безпечної експлуатації. Щорічна потреба у ремонті трубопроводів складає до 2,5 тис. км…3,0 тис. км. Але в

наш час, у зв'язку з важкою економічною ситуацією в Україні, роботи з відновлення газопроводів майже не ведуться.

З наведеного видно, що технічний стан лінійної частини магістральних нафто- та газотранспортних систем знаходиться в дуже незадовільному стані.

Через це все частіше виникають витоки та втрати продуктів через свищі крізь втомлені тріщини в трубах та через корозійне зношування металу труб. Такі втрати стають дедалі безпечнішими, що призводить до аварій та значних фінансових втрат та екологічних проблем. Статистичні дані [5] свідчать, що кількість аварій неухильно зростає, особливо на трубопроводах, у яких термін експлуатації перевищує 25…35 років. Аналіз причин аварій на нафто- та газопроводах свідчить, що переважною причиною (37 %) з усіх аварій є корозійне руйнування металу труб.

Загальна протяжність магістральних нафто- та газопроводів у США, у тому числі місцевого значення, становить понад 716 тис. км, з яких понад 448 тис. км – газопроводи та 268 тис. км. нафто- та продуктопроводи. Технічний стан цих трубопроводів не набагато кращий, ніж в Україні. Їх відновлення можливе лише за рахунок виконання капітального ремонту труб, що обумовлює виконання величезних об'ємів земляних робіт з відкриттям та закриттям підземних транспортних комунікацій або прокладання нових сіток [6].

Аналіз технологій безтраншейного прокладання трубопроводів та методів розробки ґрунту

Технологія будівництва трубопроводів передбачає проведення цілого циклу робіт пов'язаних з рекультивацією земель, розробки ґрунту, укладання нового трубопроводу та його засипання [7]. На кожному етапі задіяна важка будівельна техніка: бульдозери, екскаватори, трубоукладачі, транспортні засоби тощо. Загальна ширина смуги відводу для будівництва тільки для труб діаметром до 426мм становить 25м. Для великих діаметрів до 1420 мм до 36 м. Оскільки траси трубопроводів проходять, як правило, по сільськогосподарських угіддях і пахатних землях, то можна собі уявити масштаби руйнувань природи та екологічних порушень, які відбуваються внаслідок впливу на навколишнє середовище від техніки, що застосовується. Одним із шляхів підвищення екологічної безпеки при будівництві та ремонті трубопровідних систем є застосування сучасних безтраншейних технологій, які багато в чому дозволяють уникнути вище перелічених проблем: відмовитися від масової вирубки дерев, перемішування родючого та мінерального шарів ґрунту, переущільнення ґрунту, забруднення ґрунту.

Під безтраншейними технологіями розуміють методи прокладання, заміни, ремонту, інспекції, виявлення та ліквідації дефектів підземних комунікацій різного призначення з мінімальним порушенням поверхні ґрунту [8].

Рис. 3 – Класифікація безтраншейних технологій прокладання комунікацій

Fig. 3 – Classification of trenchless communication laying technologies

До таких технологій відносяться (рис.3): прокладання трубопроводів методами заглиблення та протягування, призначених для лінійно протяжних об'єктів (ЛПО) та прокладання відносно коротких ділянок трубопроводів під водними перешкодами та дорогами методами проколу, продавлювання, розкочування та керованого буріння. Для великих діаметрів застосовуються технології тунелювання та щитової проходки.

Принцип роботи машин для безтраншейних технологій прокладання трубопроводів щодо невеликих діаметрів для розподільчих мереж та міжселяльних трубопроводів, діаметр яких зазвичай не перевищує 300мм, пояснюється рисунком 4.

Ці технології прокладання комунікацій отримали широке використання також і у світовій практиці [9-13].

Особливий інтерес останнім часом мають технології горизонтально-спрямованого буріння. Головним їх призначенням є подолання перешкод по дорозі траси трубопроводу як річок, доріг, об'єктів садово-паркової архітектури тощо. Висока точність проколу дозволяє використовувати технологію в обмежених міських умовах та місцях скупчення перетину комунікацій.

Принцип роботи технології горизонтально спрямованого буріння подано на рис. 5. Полягає він у виконанні піонерного проколу спеціальної прокольної головки керованої шляхом її обертання чи припиненням у потрібний момент. При цьому завдяки зміщенню центру головки відбувається зміщення траєкторії при статичному тиску головки на ґрунт через штанги. Контроль за процесом здійснюється за допомогою навігатора, що приймає сигнали від вбудованого в прокольній головці датчика.

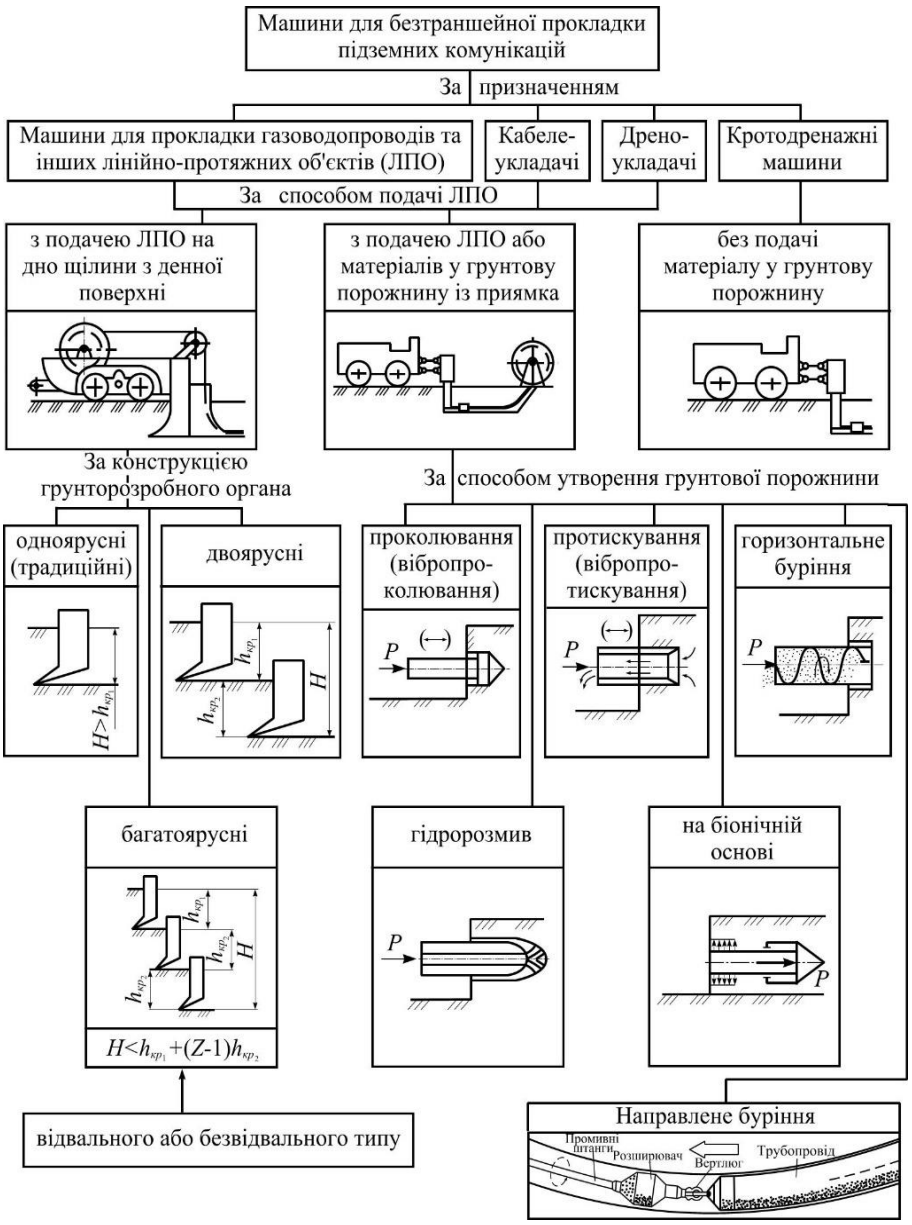

Рис. 4 – Основні технологічні схеми укладання ЛПО у підземний горизонт безтраншейними способами

Fig. 4 – Main technological schemes for laying LPO in the underground horizon using trenchless methods

Використання нових прогресивних технологій будівництва інженерних комунікацій призводить до появи «нових» чинників на довкілля (повітря, ґрунт, флору і фауну). Відсутність розритий та перемішування мінеральних шарів із гумусом безсумнівно позитивний екологічний прогрес. Однак використання бентонітових розчинів, порушення процесів тепло-, волого-, повітрообміну в шарах ґрунту, різка зміна «щільності забудови» у світі підземних комунікацій теж буде позначатися на природній збалансованості довкілля багатьох живих істот, рослин, мікроорганізмів і тощо.

Метою досліджень є виявлення особливостей процесів безтраншейного прокладання інженерних комунікацій та встановлення їх впливу на довколишнє середовище.

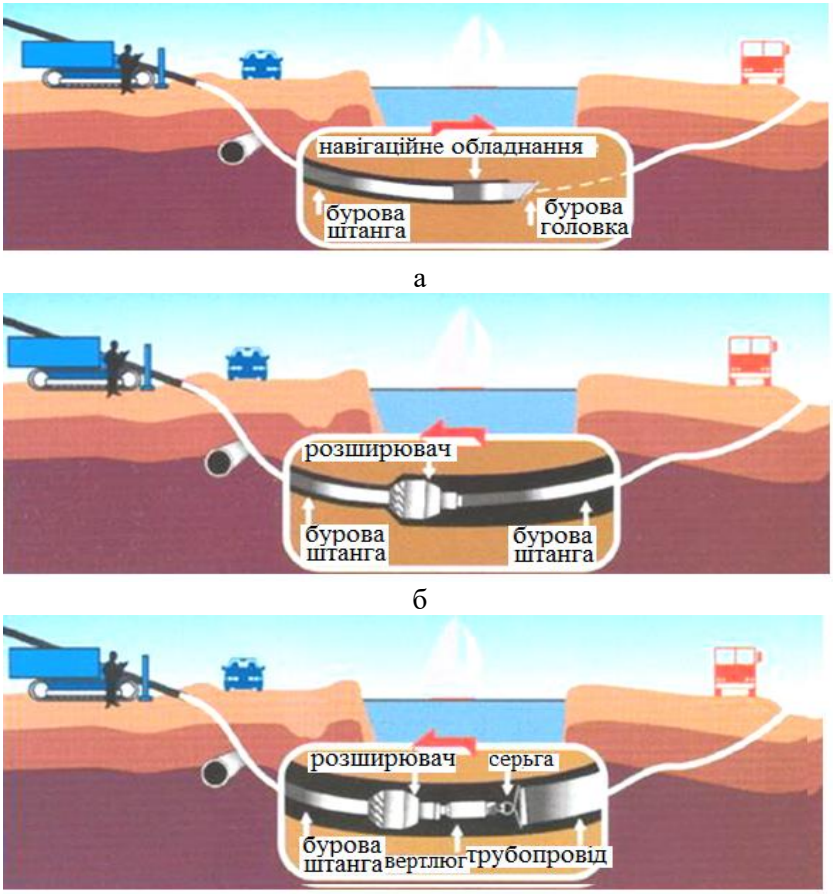

Рис. 5 – Технологічна схема будівництва переходів трубопроводів під перепонами методом горизонтально спрямованого буріння: а – формування пілотної свердловинностатичним проколом з керуванням траєкторії; б – розширення пілотної свердловини методом буріння; в – затягування трубопроводу

Fig. 5 – Technological scheme for the construction of pipeline crossings under obstacles using the horizontal directional drilling method: a – formation of a pilot well by static puncture with trajectory control; b – expansion of a pilot well by drilling; c – tightening of the pipeline

Антропогенний та техноґенний вплив безтраншейних технологій та нормативні вимоги екологічної безпеки до них

Враховуючи, що головною метою екологічної експертизи проектів виконання робіт є мінімізація антропогенного та техногенного впливу на навколишнє середовище, збереження та покращення її якості заради здоров'я та працездатності людини проаналізуємо нормативи та вимоги екологічної безпеки щодо кожного об'єкта стандартизації окремо.

Охорона водних ресурсів. При виконанні робіт з використанням установок спрямованого буріння, трубозаглиблювачів, кабеле-

укладачів, пробійників необхідно неухильно виконувати технологічні, гідротехнічні, санітарні заходи, заплановані у проектах організації будівництва та виконання робіт, особливо, якщо роботи ведуться поблизу річок, озер та водойм. При виконанні робіт підрядник зобов'язаний:

- не порушувати режиму використання водоохоронних зон; утримувати у справному стані очисні та інші водогосподарські споруди та технічні пристрої;
- склади-сховища витратних матеріалів та бурового шламу розміщувати поза водоохоронними зонами і при необхідності виконувати протифільтраційне екранування;
- в межах водоохоронної зони не заправлення машин ПММ, їх миття та ремонт;
- будівельні майданчики для організації виконання робіт розміщувати поза прибережною захисною смугою;
- не допускати погіршення якості поверхневих і ґрунтових вод, довкілля мікрофлори та фауни;
- проводити технічну та біологічну рекультивацію земель після завершення робіт;
- інформувати органи нагляду про аварійні та інші надзвичайні ситуації, що впливають на якість та стан водних ресурсів.

Скидання очищених стічних вод навіть у межах допустимого рівня має бути узгоджене з територіальними органами нагляду міністерства охорони здоров'я, Рибводгоспу, Мінекології та інших державних служб та комітетів. Вимоги до стічних вод та їх осад викладено, а технічні вимоги до методів випробувань сигналізаторами токсичності викладено у ДСТУ 4004-2000. Отримані дозволи на обсяг, концентрацію та періодичність дають право здійснювати скидання, зрошення, добриво або повторне використання стічних вод та розчинів.

Після завершення робіт передбачається проведення:

- робіт із відновлення системи місцевих водопотоків; розчищення русел, улоговин, каналів від ґрунту, що потрапив тощо;
- оцінки якості виконаних робіт та виявлення порушень рельєфу, укосів каналів, схилів ярів, балок та ін.
- вимірів якості води та водних об'єктів, зміни їх фізико-хімічного та біологічного складу; визначення можливості подальшого використання для господарсько-технічних та питних потреб.

Методики цих оцінок та випробувань, умови пробовідбору затверджені Держстандартами: ДСТУ 3913-99, 3920-99, ДСТУ ISO 5667-3-2001, ДСТУ 4107-2002 (ISO 5667-16-1998) та їх виконання є керівника.

Охорона повітряного басейну. Особливістю проведення будівельних робіт та експлуатації техніки є те, що більшість джерел, що забруднюють атмосферу, постійно змінює місце своєї дислокації, змінюється і навантаження на машини, за часом використання, за характером роботи, погодними умовами тощо тому визначення комплексного індексу забруднення повітря (за сукупністю впливу кількох шкідливостей) дещо утруднено. Як норматив якості атмосферного повітря встановлюють максимальну разову або середньодобову концентрацію шкідливих речовин (ГДКмр, ГДК сд) для робочої зони та для території будівельного майданчика, яка приймається як $ГДК_{тп} \leq 0{,}3ГДК_{рз}$. У разі потреби регламентують і обсяги викидів в одиницю часу (ГДВ), і орієнтовно безпечні рівні впливу (ОБРВ), якщо немає нормативів ГДК (ГДК).

Методи вимірювання цих параметрів, а також самі норми для транспортних засобів з двигунами, що працюють на бензині, газі, дизпаливі, встановлені ДСТУ 4276-2004; 4277-2004; ДСТУ ISO 4226-2004 тощо.

Аналізатори вихлопних газів транспортних засобів та інші прилади контролю використовуються ДСТУ 2501-94 для вимірювання концентрацій окису вуглецю, вуглеводів, визначення димності вихлопу газових дизелів та інших показників забруднення атмосфери. З метою охорони повітряного басейну під час виконання будівельних робіт рекомендується планувати та виконувати наступні заходи:

- періодично змочувати будівельно-монтажні майданчики для зниження пилу під час виконання робіт;
- своєчасно проводити регламентні роботи з регулювання та ремонту ДВЗ з метою зниження викидів шкідливих речовин у продуктах згоряння;
- за несприятливих метеоумов знижувати інтенсивність викидів на 15% (посилення вітру, зміна його напряму, висока температура повітря, підвищення атмосферного тиску);
- створювати санітарно-захисні зони (СЗЗ) у населених пунктах з урахуванням вимог ДНАОП 0.03-3.01-71 (СН 245-71);

наприклад, для будівельного об'єкта 5-го класу – мінімальний розмір C_{33} = 50 м;

- аналізувати спільну дію різних шкідливостей, одночасно які знаходяться в повітрі робочої зони, з урахуванням ефекту сумації та синергізму (взаємного посилення впливу або зниження захисних механізмів органів дихання людини).

У зоні будівництва можливе підвищення концентрації окису та двоокису азоту, сажі сумацій двоокису азоту та сірчистого ангідриду, а також пилення порошків для бентонітових сумішей.

Охорона якості та властивостей ґрунтів. Виконання земляних робіт, використання бентоніту при безтраншейних технологіях прокладання інженерних комунікацій навіть за дотримання всіх вимог ПОС та ППР все-таки призведе до деяких забруднення ґрунтів та зміни показників їх якості. Це можуть бути фонові, локальні зони забруднення, рідше регіональні та глобальні.

Найбільшу небезпеку для рослинного шару ґрунтів становлять хімічні забруднення, засолення та підвищена ерозія. Паспорт ґрунту, який дає найбільш повну характеристику фонових концентрацій (ДСТУ 4288-2004), дозволяє оцінити рівень забруднення за змінами рівнів забруднення за кожним показником. При цьому середнім ступенем вважається рівень вищий за фоновий, але не перевищує ГДК. Основні поняття, термінологія, забруднення та охорона якості ґрунтів викладені у серії міжнародних стандартів ДСТУ ISO 11074-1(2.4):2004. Порівнюючи чинні в Україні нормативи ГДК з аналогічними показниками країн західної Європи та США, можна зробити висновок, що у 80% випадків українські нормативи є більш жорсткими. Але не завжди ці вимоги можна технічно та економічно реалізувати сьогодні. Ущільнення ґрунту вважається головним показником, який впливає на врожайність сільськогосподарських культур. Ущільнене з'єднання його мінеральних частинок призводить до того, що коренева система рослин отримує обмежений доступ до води, повітря та харчових речовин, що в свою чергу обмежує зростання та врожайність культур, яка може досягати до 50% та більше [14].

На сьогодні ця проблема впливу щільності ґрунту на розвиток сільськогосподарських культур найкраще вивчена на прикладі ущільнення ґрунту від сільськогосподарської техніки [15-18]. Було встановлено, що збільшення щільності на 0,1 г/см3 призводить до зниження врожайності зернових на 6 ц/га, а картопля на 15-25 ц/га. Проведеними дослідженнями також виявлено, що на суглинистих ґрунтах із глибини 0,4м при абсолютній вологості 15-20% із збільшенням щільності збільшується її твердість та категорія. Це добре видно з дослідження слідів трактора К-701. Зміна фізико-механічних властивостей ґрунту від кількості проходки трактора наведено на рисунку 1.

З наведених ґрафіків видно, що ущільнення ґрунту призводить до зміни його категорії міцності, яка з іншої при числі ударів ударника ДорНДІ (число С – 5-8) після 4 шести проходів трактору К-701 на глибині до 0,25 м переходити до третини (число ударів). Крім втрати врожайності зріс опір обробки ґрунту, який у свою чергу збільшив витрати палива.

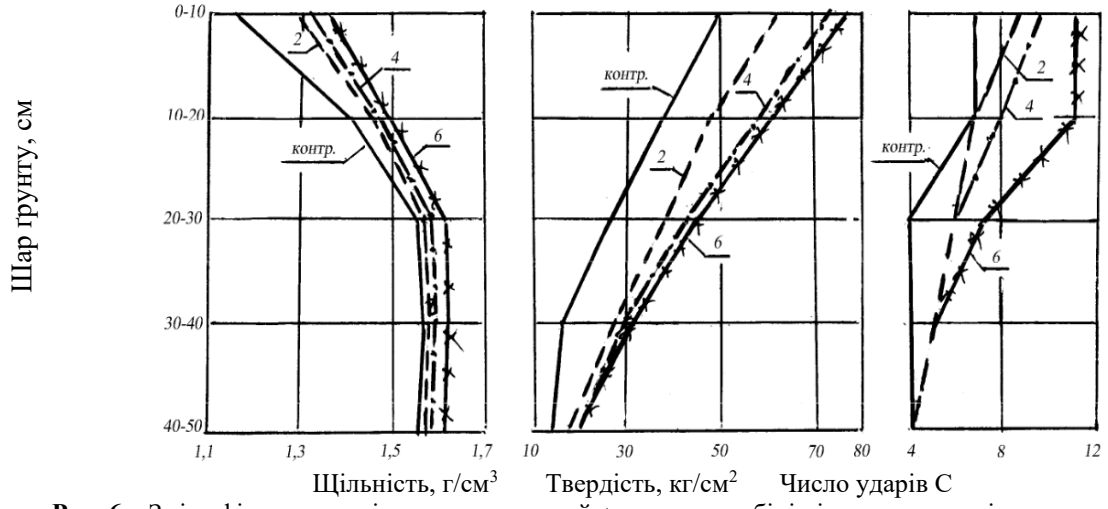

Рис. 6 – Зміна фізико-механічних властивостей ґрунту по глибині під впливом коліс трактором К-701: 2, 4, 6 – число проходів трактора по одному сліду

Fig. 6 – Change in physical and mechanical properties of soil along the depth under the influence of wheels of the K-701 tractor: 2, 4, 6 – the number of tractors passes along one track

Різке погіршення властивостей ґрунту призвело до зниження врожаю, наприклад, зеленої маси кукурудзи на 40-60%.

Негативний вплив на стан ґрунту на врожайність та розвиток рослин впливає ущільнення ґрунту. Воно виникає як від тиску на поверхню гумусного шару від важкої техніки, так і від глибинного ущільнення ґрунту при його глибокому різанні та радіальному ущільненні ґрунту при формуванні свердловини.

У роботах [19, 22] пропонується вважати, що розмір зони структурних змін, що утворюється безпосередньо прилеглої до свердловини, має постійну твердість. Її розміри визначають відповідно зону пружно-пластичних деформацій, в якій щільність ґрунту поступово згасає в міру видалення в масив ґрунту від свердловини. Розмір мінімального діаметра зони структурних змін D_p безпосередньо пов'язаний з пористістю ґрунту n_o. яка добре описується формулою:

$$D_p = D_{\text{скв}}\left[4,4 + \frac{1}{\left(0,01 n_0\right)^{2,25}}\right] \qquad (1)$$

де $D_{\text{скв}}$ – діаметр свердловини, м;

n_o – природна пористість ґрунту, %

На рисунку представлено графічне зображення розмірів зони структурних змін ґрунту для двох найбільш характерних діаметрів свердловин. $d_1 = 65$ мм і $d_2 = 108$ мм, які використовують при лідерній проходці.

На рисунку представлений графік залежності мінімального розміру зони структурних деформацій для трьох значень пористості ґрунту: $n_0 = 38\,\%$; $n_0 = 45\,\%$; $n_0 = 53\,\%$, які характерні для найпоширеніших ґрунтів на території України суглинку та супіску з числом ударів ударника ДорНДІ 5-7 разів.

Як видно із графіків, представлених на рис.7–8 залежності зони структурних змін та мінімальної глибини проколу справді носять однаковий характер залежності від пористості ґрунту. Також проглядається пряма залежність мінімального розміру зони структурних змін при проколі ґрунту.

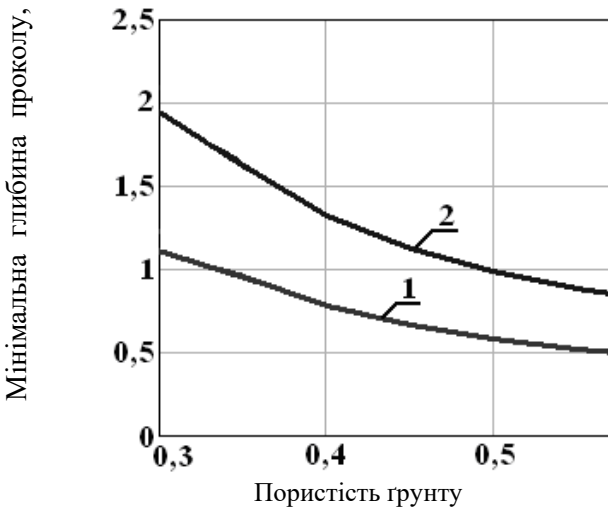

Рис. 7 – Залежність мінімальної глибини проколу від пористості ґрунту: 1 – для проколу $d_1 = 65$ мм; 2 – для діаметра проколу $d_2 = 108$ мм

Fig. 7 – Dependence of the minimum puncture depth on soil porosity 1 – for puncture $d_1 = 65$ mm; 2 – for puncture diameter $d_2 = 108$ mm

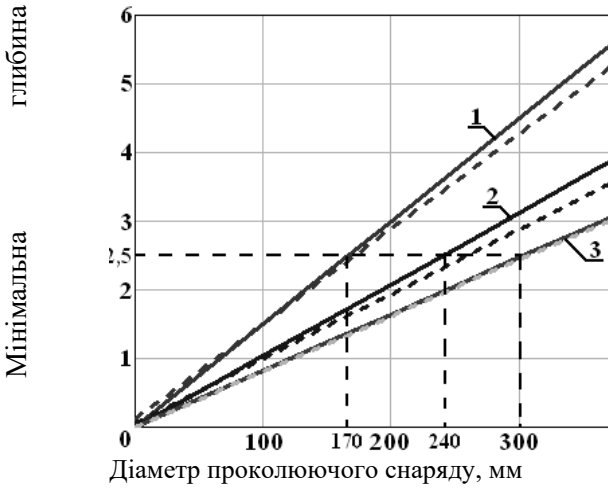

Рис. 8 – Залежність мінімальної глибини проколу свердловини від діаметра конусного наконечника
— розрахункове значення;
--- експериментальне значення;
1 – $n_0 = 38$ %; 2 – $n_0 = 45$ %; 3 – $n_0 = 53$ %

Fig. 8 – Dependence of the minimum depth of the well puncture on the diameter of the cone tip
— calculated value; --- experimental value;
1 – $n_0 = 38$ %; 2 – $n_0 = 45$ %; 3 – $n_0 = 53$ %

З метою запобігання забруднення та деградації ґрунтів, а також зниження прямих втрат ґрунтового гумусу під час виконання робіт необхідно виконувати наступне:

- контролювати межі землевідведення за проектними дослідженнями, не допускаючи руху транспорту та будівельної техніки поза встановленими маршрутами;
- по можливості застосовувати будівельні машини та механізми, що мають мінімальний питомий тиск рушія;
- виключати скидання та витік ПММ, неочищених промстоків та інших забруднювачів на поверхню ґрунту;
- виконувати гідроізоляцію майданчиків для зберігання техніки та під іншими об'єктами, де можливий витік забруднюючих рідин;
- дотримуватись вимог екологічних, агротехнічних, санітарно-гігієнічних, будівельних та інших нормативів, пов'язаних з подальшим використанням та ре культивацією земель.

Для запобігання ерозії рекомендується:

- максимально зберігати природний стік та водопропускні пристрої;
- застосовувати настили, сітки для стабілізації схилів з крутістю 2 і більше градусів;
- при рекультивації розорювати ґрунт упоперек схилу з метою недопущення утворення лінійних борозден, колії, канави.

Всі ці заходи дозволяють зберегти властивості та якість ґрунту, особливо його родючого шару.

Основні завдання, які потрібно вирішувати підвищення екологічної безпеки будівельних технологій, зокрема. та безтраншейних, пов'язані зі створенням сучасних будівельних машин, їх робочих органів при звичайному режимі експлуатації, зниження техногенного впливу на середовище при аварійних ситуаціях та катастрофах.

Залишається маловивченим і вплив коливальних впливів (шум, вібрація, віброударне руйнування) на довкілля. Особливо шкідливий вплив вібровпливів. Існуючі нормативи стосуються переважно захисту людини (ДСН 3.3.6.037-99, ДСН 3.3.6.039-99) та техніки (СТСЕВ 1932-79, СТСЕВ 2602-80). А вплив цих факторів, що мають як прямий, так і опосередкований вплив на навколишнє середовище (у будівництві – це в основному земляні роботи) на сьогоднішній день взагалі ніяк не регламентуються.

Україна пов'язана підписаними договорами та ратифікованими конвенціями більш ніж за 20 міжнародними зобов'язаннями. Тому не можна допустити без системного та безконтрольного використання природних ресурсів, руйнування природи, надмірного впливу на середовище, а отже, і згубного впливу шкідливих наслідків внаслідок порушення екологічної рівноваги на людину.

Висновки

З проведеного аналізу технічного стану трубопроводів встановлено, що вони вимагають постійної підтримки та відновлення. Це пов'язано з фізичним зношенням труб, їх пошкодженням ізоляційного покриття та ржавінням металу. Ризики отримання катастроф техногенного та екологічного характеру зростають із збільшенням строку їх експлуатації.

З урахуванням економічної недоцільності подальшої підтримки робочого стану трубопроводів шляхом безкінечного латання дір пропонується заміняти їх на нові використання безтраншейних технологій ремонту, або нового будівництва.

Перехід на такі технології у порівнянні з традиційними траншейними дозволяють значно зменшити смугу відведення для будівництва, що в свою чергу скорочує обсяг вирубки лісів, руйнування паханих земель, зменшує кількість важкої техніки.

У статті виявлено особливості роботи спеціальних машин та обладнання для створення комунікаційних полостей у ґрунті та встановлено їх вплив на екологічну безпеку довколишнього середовища.

У роботі проаналізовано діючі нормативи та вимоги екологічної безпеки по кожному об'єкту стандартизації окремо. А саме: охорона водних ресурсів, охорона повітряного басейну, охорона якості та властивості ґрунтів. Науково було доведено, що безтраншейне формування комунікаційних порожнин шляхом радіального ущільнення ґрунту змінює його структуру на відстань до 15 діаметрів

свердловин. Що значно впливає на розвиток рослин та фруктових дерев.

Також виявлено вплив на продуктивність сільськогосподарських від ущільнення орної кулі ґрунту від коліс чи гусениць машин.

Отримані результати роботи можуть бути рекомендовані при створенні екологічної експертизи проектів та при виборі найбільш ефективних безтраншейних технологій та машин для їх використання.

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 Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] : Розпорядження Каб. м-в України від 15.03.2006 № 145-р. – Режим доступу : www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc. (дата звернення 14.11.2025)

2 Діяк І. В. Газова промисловість України на зламі століть / І. В. Діяк, З. П. Осінчук ; за ред. І. М. Короп. – Івано-Франківськ : Лілея-НВ, 2000. – 231 с.

3 Заключний документ Гаазької конференції з Європейської енергетичної хартії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/995_061. (дата звернення14.11.2025)

4 Костенко Є. О. Енерготранзитний потенціал України та перспективи його реалізації у контексті забезпечення енергетичної безпеки / Є. О. Костенко, В. В. Мірошниченко // Ефективна економіка. – 2012. – № 9.

5 Музико В. Д. Безпека та ресурсозбереження під час виконання капітального ремонту магістрального трубопроводного транспорту / В. Д. Музико, М. П. Кузьмінець, В. Х. Баланін // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Харків : ХДМІ, 2010. Т. 1. С. 175–179.

6 Трубопровідний транспорт газу ; за ред. М. П. Ковалка. – Київ : Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. – 600 с.

7 Василюк В. М. Надійність та безпека транспортування нафти територією України [Електронний ресурс] / В. М. Василюк // Нафтогазовий комплекс України на шляху реформування, модернізації, розвитку : міжнар. конф. – Київ, 2016. – Режим доступу : oilgas-expo.com/static/content/img_razdel/demo/2/7.pdf. (дата звернення 14.11.2025)

8 Василюк В. М. Основні напрямки забезпечення надійності експлуатації магістральних нафтопроводів України / В. М. Василюк // Забезпечення експлуатаційної надійності систем трубопровідного транспорту : зб. доп. наук.-техн. семінару. – Київ : ІЕЗ ім. О. О. Патона, 2009. – С. 5–8.

9 Укртрансгаз. Ми транспортуємо та зберігаємо енергію незалежності [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://utg.ua. (дата звернення 14.11.2025)

10 ДСТУ ISO 19011:2003. Настанови щодо здійснення аудитів систем керівництва якістю та (або) екологічного управління [Електронний ресурс]. – Режим доступу : .https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=7242 (дата звернення 14.11.2025)

11 13.020.30 – ISO. Група стандартів – оцінювання впливу на довкілля : електрон. ресурс. Режим доступу : https://www.iso.org/ua/ics/13.020.30.html. (дата звернення 14.11.2025)

12 ДСТУ 2984-95 Засоби транспортні дорожні [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://dnaop.com/html/60087/doc-ДСТУ_2984-95. (дата звернення 14.11.2025)

13 ДСТУ 4276:2004. Система стандартів у галузі охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання ресурсів. Атмосфера. Норми і методи вимірювань димності [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY/dsty_4276-2004.pdf. (дата звернення 14.11.2025)

14 Alaoui A. Changes in soil structure guiding trafficability / Alaoui A., Diserens E. // Geoderma. – 2011. – Vol. 163, № 3–4. – P. 283–290.

15 Batey T. Soil compaction and soil management – a review / T. Batey // Soil Use and Management. – 2009. – Vol. 25, № 4. – P. 335–345.

16 Horn R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment / Horn R., Domżzał H., Słowińska-Jurkiewicz A., Van Ouwerkerk C. // Soil and Tillage Research. – 1995. – Vol. 35, № 1. – P. 23–36.

17 Nawaz M. F. Soil compaction and modelling: a review / Nawaz M. F., Bourrié G., Trolard F. // Agronomy for Sustainable Development. – 2013. – Vol. 33. – P. 291–309. DOI: 10.1007/s13593-011-0071-8.
18 Sakai H. Soil Compaction on Forest Soils from Different Kinds of Tires and tracks and Possibility of Accurate Estimate / Sakai H., Nordfjell T., Suadicani K., Talbot B., Bøllehuus E. // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2008. – Vol. 29, № 1. – P. 15–27.
19 Супонєв В. М. Визначення величини зони деформування ґрунту конусно-циліндричним наконечником та тиску на бічній поверхні / В. М. Супонєв // Вісник ХНАДУ. – 2018. – Вип. 83. – С. 22–28.
20 Suponiev V. Determination of deformation zone and lateral pressure on underground utilities / Suponiev V., Kravets S., Posmitukha A., Kulashenko Y. // Technology Audit and Production Reserves. – 2018. – № 5/1 (43). – P. 11–16. DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146626.
21 Сучасний технічний стан магістральних трубопроводів та оцінка екологічної безпеки при транспортуванні по ним енергетичних носіїв / Богатов О. І., Супонєв В. М., Рагулін В. М., Ярижко О. В., Мусійко В. Д. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2022. – Вип. 99. – С. 151–158.
22 Determining the angle of the frontal working surface of the soil-piercing head asymmetrical tip for static soil-piercing / Suponyev, V., Ragulin, V., Oleksyn, V., Koval, O., Koval, A., Vysokovych, Y. // Automobile Transport. – 2024. – no 54, –25–31. DOI: https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.54.0.03. (дата звернення 14.11.2025)

Отримано: 10.10.2025 Прийнято: 14.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[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
[1]**ROZENFELD M.,** Senior Lecturer, Department of Construction and Road Machinery
named after A. M. Kholodov
email:kr426571@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6397-7319
[1]**NAVOLOKOV V.,** Postgraduate student of the Department of Operation, Testing, and Service construction and road machinery
email: slaviknavolokov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-0258-1397
[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]*Kharkiv National Automobile and Highway University*
Yaroslava Mudrogo str. 25,61002, Kharkiv, Ukraine

ENVIRONMENTAL SAFETY OF TRENCHLESS TECHNOLOGIES

The article provides an analysis of modern trenchless technologies for the construction of communication networks, which include pipelines for water and energy supply, electrical cables and communication cables. Since trenchless laying of communications involves creating a cavity in the soil, the relevant technical means and processes that occur in this process were reviewed.

Due to the fact that the purpose of the environmental expertise of works production projects is to minimize anthropogenic and technical impact on the environment, preserve and improve their properties for the sake of human health, the purpose of the article was to identify the features of these technologies from the point of view of environmental safety. The paper analyzed the current standards and requirements for environmental safety for each standardization object separately. Namely: protection of water resources, protection of the air basin, protection of the quality and properties of soils.

Considering that earthworks are associated with a significant loss of crop yields, an additional assessment of the impact of soil structural changes on the yield was made when creating wells in the soil by

radial compaction. Relevant conclusions and practical recommendations for trenchless laying of underground communications were made.

Trends in the development of modern construction technologies are moving towards trenchless methods of construction work, which have their own characteristics and impact on environmental safety. Consideration of modern trenchless technologies from the point of view of environmental safety is a relevant issue.

KEYWORDS: distribution pipelines, gas pipelines, oil pipelines, earthworks, pipeline reconstruction, man-made disasters, reliability of energy supply, environmental safety, environment.

In cites: Suponyev V., Ragulin V., Rozenfeld M., Navolokov V., Lemets O. (2025). Environmental safety of trenchless technologies. Engineering, (36), 38-50. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-04 (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 Kabinet Ministriv Ukrainy 2006, *Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku* [Energy strategy of Ukraine for the period up to 2030], *viewed* <www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc> (Last accessed November 14, 2025)

2 Diak, IV & Osinchuk, ZP 2000, 'Hazova promyslovist Ukrainy na zlami stolitt' [Gas industry of Ukraine at the turn of the century], Lileia-NV, Ivano-Frankivsk.

3 Haazka konferentsiia z Yevropeiskoi enerhetychnoi khartii 2006, 'Zakliuchnyi dokument' [Final document of the Hague Conference on the European Energy Charter], *viewed* < http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/995_061> (Last accessed November 14, 2025)

4 Kostenko, EO & Miroshnychenko, VV 2012, 'Enerhetranzitnyi potentsial Ukrainy ta perspektyvy yoho realizatsii u konteksti zabezpechennia enerhetychnoi bezpeky' [Energy transit potential of Ukraine and prospects for its implementation in the context of energy security], *Efektyvna ekonomika*, Vol. 9 (in Ukraine)

5 Musiiko, VD, Kuzminets, MP & Balanin, VKh 2010, 'Bezpeka ta resursozberezhennia pid chas vykonannia kapitalnoho remontu magistralnoho truboprovodnoho transportu' [Safety and resource saving during major repairs of trunk pipeline transport], *Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnolohii na transporti,* Vol. 1, Pp. 175–179 (in Ukraine)

6 Kovalko, MP, Hrudz, VYa, Mykhalkiv, VB et al 2002, *Truboprovidnyi transport hazu* [Pipeline gas transport], Ahentstvo z ratsionalnoho vykorystannia enerhii ta ekologii, Kyiv. (in Ukraine)

7 Vasyliuk, VM 2016, 'Nadiiinst ta bezpeka transportuvannia nafty terytorieiu Ukrainy' [Reliability and safety of oil transportation in Ukraine], *Naftohazovyi kompleks Ukrainy na shliakhu reformuvannia, modernizatsii, rozvytku*, *Kyiv, 26.10.2016*, *viewed* <oilgas-expo.com/static/content/img_razdel/demo/2/7.pdf> (Last accessed November 14, 2025)

8 Vasyliuk, VM 2009, 'Osnovni napriamky zabezpechennia nadiinosti ekspluatatsii magistralnykh naftoprovodiv Ukrainy' [Main directions for ensuring reliability of operation of trunk oil pipelines], *Zabezpechennia ekspluatatsiinoi nadiinosti system truboprovidnoho transport*, Kyiv, Pp. 5–8 (in Ukraine)

9 Ukrtranshaz 2023, *My transportuiemo ta zberihaiemo enerhiiu nezaleznosti* [We transport and store the energy of independence], *viewed* <http://utg.ua> (Last accessed November 14, 2025)

10 DSTU ISO 19011:2003 2003, *Nastanovy shchodo zdiisnennia auditiv system kerivnytstva yakistiu ta (abo) ekolohichnoho upravlinnia* [Guidelines for auditing management systems], *viewed* <https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=7242> (Last accessed November 14, 2025)

11 ISO 2023, *Grupa standartiv – otsiniuvannia vplyvu na dovkillya* [Group of standards – environmental impact assessment], *viewed* <https://www.iso.org/ua/ics/13.020.30.html> (Last accessed November 14, 2025)

12 DSTU 2984-95 1995, *Zasoby transportni dorozhni* [Road transport means], *viewed* <https://dnaop.com/html/60087/doc-ДСТУ_2984-95> (Last accessed November 14, 2025)
13 DSTU 4276:2004 2004, *Systema standartiv u haluzi okhorony navkolyshnoho seredovyshcha ta ratsionalnoho vykorystannia resursiv. Atmosfera. Normy i metody vimiryuvan dymnosti* [Standards system in environmental protection and rational resource use. Atmosphere. Methods of smoke measurement], *viewed* <https://www.ksv.biz.ua/GOST/DSTY/dsty_4276-2004.pdf> (Last accessed November 14, 2025)
14 Alaoui, A & Diserens, E 2011, 'Changes in soil structure guiding trafficability' [Changes in soil structure guiding trafficability], *Geoderma*, Vol. 163, Pp. 283–290
15 Batey, T 2009, 'Soil compaction and soil management – a review' [Soil compaction and soil management – a review], *Soil Use and Management*, Vol. 25, Pp. 335–345
16 Horn, R, Domżzał, H, Słowińska-Jurkiewicz, A & Van Ouwerkerk, C 1995, 'Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environmen', *Soil and Tillage Research*, Vol. 35, Pp. 23–36
17 Nawaz, MF, Bourrié, G & Trolard, F 2013, 'Soil compaction and modelling: a review', *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 33, Pp. 291–309, DOI: 10.1007/s13593-011-0071-8
18 Sakai, H, Nordfjell, T, Suadicani, K, Talbot, B & Bøllehuus, E 2008, 'Complex of forest machinery trafficability assessment', *Croatian Journal of Forest Engineering*, Vol. 29, Pp. 15–27
19 Suponiev, VM 2018, 'Vyznachennia velychyny zony deformuvannia hruntu konusno-tsylindrychnym nakonechnikom ta tysku na bichnii poverkhni' [Determination of deformation zone and lateral pressure of soil by cone-cylinder tip], *Visnyk KhNAHU*, Vol. 83, Pp. 22–28
20 Suponiev, V, Kravets, S, Posmitukha, A & Kulashenko, Y 2018, 'Determination of deformation zone and lateral pressure on underground utilities', *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 5/1 (43), Pp. 11–16, DOI: 10.15587/2312-8372.2018.146626
21 Bohatov, O, Suponiev, V, Ragulin, V, Yaryzhko. O & Musiiko, V 2022, 'Suchasnyi tekhnichnyi stan mahistralnykh truboprovodiv ta otsinka ekolohichnoi bezpeky pry transportuvanni po nym enerhetychnykh nosiiv' [Current technical condition of main pipelines and assessment of environmental safety when transporting energy carriers along them], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, iss. 99, Pp. 151–158. (in Ukraine)
22 Suponyev, V, Ragulin, V, Oleksyn, V, Koval, O, Koval, A & Vysokovych, Y 2024, 'Determining the angle of the frontal working surface of the soil-piercing head asymmetrical tip for static soil-piercing', *Automobile Transport*, no 54, Pp. 25–31. DOI: https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2024.54.0.03 (Last accessed November 14, 2025)

Submission received: 10/10/2025 Accepted: 11/14/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05
УДК 681.5.03

Т.М. ФУРСОВА, кандидат технічних наук
доцент кафедри Автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1423-0822
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

РОЛЬ ІНТЕГРАЛЬНИХ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ В ОЦІНЦІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті досліджено особливості застосування інтегральних критеріїв якості для оцінювання процесів автоматичного регулювання в енергетичних системах. Ці складні технічні системи характеризуються підвищеними вимогами до точності, стабільності та енергоефективності, де показники якості перехідних процесів безпосередньо впливають на надійність функціонування обладнання та ефективність технологічних процесів. Традиційні методи оцінювання, що базуються на розв'язанні диференціальних рівнянь або детальному аналізі перехідних характеристик, є трудомісткими та недостатньо придатними для оперативної діагностики, що актуалізує використання інтегральних критеріїв як більш простих та універсальних показників. У роботі проведено системний аналіз найбільш поширених інтегральних критеріїв, включно з лінійним, квадратичним та узагальненим, та визначено їх придатність для оцінювання різних типів перехідних процесів. Лінійний критерій розглянуто як найпростіший інструмент для швидкої оцінки затухання коливань, однак підкреслено його обмеженість у випадках зміни знаку регулювальної помилки та коливального характеру процесу. Квадратичний критерій позбавлений цього недоліку та дозволяє оцінювати енергетичний складник відхилень, що робить його ефективним при оптимізації систем автоматичного регулювання та порівнянні їхньої економічної ефективності. Розглянуто також узагальнені інтегральні критерії, що базуються на квадратичних формах стану і широко застосовуються в задачах оптимального керування. Показано, що мінімізація інтегральних критеріїв не завжди гарантує досягнення бажаної форми перехідного процесу, зокрема з точки зору ступеня коливальності та сталості. Тому обґрунтовано доцільність їх поєднання з додатковими показниками якості, що дозволяє уникнути некоректної оцінки та забезпечує комплексний підхід до аналізу роботи систем автоматичного керування. Отримані результати підтверджують високу практичну цінність інтегральних критеріїв як інструменту швидкого та інформативного контролю якості регулювання в енергетичних та промислових системах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: якість, оцінка, інтегральні критерії, автоматичне регулювання.

Як цитувати: Фурсова Т. М. (2025). Роль інтегральних критеріїв якості в оцінці систем автоматичного регулювання складних енергетичних комплексів. Машнобудування. 2025. Вип. 36 С. 51-59. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05

© Фурсова Т. М. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

Сучасні складні енергетичні системи висувають підвищені вимоги до ефективності та точності автоматичного регулювання, оскільки від якості керування значною мірою залежать енергоефективність, надійність та стабільність функціонування обладнання. Традиційні підходи до оцінювання якості процесів регулювання часто спираються на аналіз перехідних процесів або розв'язання диференціальних рівнянь, що ускладнює практичне застосування таких методів для оперативної діагностики та оптимізації режимів роботи систем. У цьому контексті інтегральні критерії якості регулювання становлять значний інтерес завдяки своїй простоті, універсальності й можливості обчислення без необхідності розв'язання вихідних диференціальних рівнянь.

Інтегральні критерії якості регулювання залишаються одним із най поширеніших інструментів аналізу та оптимізації систем автоматичного керування.

У роботі [1] запропоновано новий багатокритеріальний інтегральний показник, який враховує енерговитрати управляючої дії. Автори показують, що такий критерій дозволяє зменшити коливальність та поліпшити якість регулювання у системах зі слабким демпфуванням. Подібні висновки робляться в [2] та [3], які демонструють суттєву залежність якості перехідного процесу від вибору інтегрального критерію.

У галузі енергетичних систем автори [4] запропонували нову групу вагових інтегральних критеріїв, адаптованих до задач автоматичного регулювання частоти та навантаження. Їх результати доводять, що модифіковані індекси забезпечують суттєве зниження амплітуди коливань порівняно з класичними інтегральними критеріями.

У промислових технологічних процесах інтегральні критерії широко застосовуються у моніторингу продуктивності контурів керування. Науковці у [5] розглядають основні діагностичні метрики, що дозволяють визначати деградацію регулятора, зміну динаміки об'єкта чи зсуви параметрів.

У контексті сучасних структур керування значну увагу приділено застосуванню інтегральних критеріїв у налаштуванні фракційних регуляторів. Робота [6] показує, що класичні інтегральні критерії природно інтегруються у задачі оптимізації, забезпечуючи суттєве поліпшення точності та стійкості у складних системах з фракційною динамікою. Подальші модифікації інтегральних показників були запропоновані в [7] для нелінійних невизначених об'єктів.

Одним із комплексних досліджень останнього часу є робота [8], де запропоновано підхід до оцінювання ефективності PID-регулятора на основі експериментальних даних відгуку об'єкта та інтегральних показників. Результати підтверджують, що інтегральні критерії залишаються фундаментальним інструментом порівняння якості керування.

Оцінка якості систем автоматичного регулювання розглядається у вітчизняних роботах [9] і [10].

Аналіз літературних джерел демонструє, що інтегральні критерії залишаються ключовим елементом у теорії та практиці автоматичного керування, проте їх обмеження у коливальних системах зумовлюють потребу у комбінованих показниках, які враховують демпфування, стійкість та енергетичні параметри процесу.

Метою роботи є обґрунтування можливостей використання інтегральних критеріїв як найбільш простих способів оцінки якості для удосконалення процесів автоматичного управління. Для досягнення поставленої мети проведений аналізу інтегральних критеріїв якості регулювання та вивчення їх ефективності при застосуванні до складних технічних систем в енергетиці.

Методика

Дослідження сталості систем автоматичного регулювання дозволяє встановити області значень їх параметрів, що відповідають затухаючим процесам регулювання, але не визначає форми процесів у будь-якому іншому відношенні. Цього недостатньо для оцінки таких систем з точки зору їх практичної придатності. Перехідні процеси у промислових системах автоматичного регулювання повинні мати цілком визначений характер згідно вимогам технології. Обмеження, що накладаються, бувають різноманітні. Однак, можна встановити деякі загальні критерії для подібних оцінок якості, що відносяться до критеріїв якості процесів автоматичного регулювання.

1. Ступень сталості процесу η, що характеризує інтенсивність його затухання.

2. Ступень коливальності процесу m, що характеризує затухання його коливальних складових.

3. Динамічна похибка регулювання $y_{дин}$, що є максимальним відхиленням регульованої величини у перехідному процесі від заданого значення.

4. Статична похибка регулювання $y_{ст}$, що дорівнює відхиленню регульованої величини у новому положенні рівноваги від її значення у початковому стані рівноваги.

5. Тривалість процесу регулювання $T_{пр}$, що є часом, протягом якого відхилення регульованої величини від заданого значення і до нового збурення буде залишатися менше визначеної, наперед заданої величини.

На рис. 1. наведені графіки перехідних процесів із відповідними оцінками якості для системи автоматичного регулювання, що описується лінійним диференційним рівнянням другого порядку.

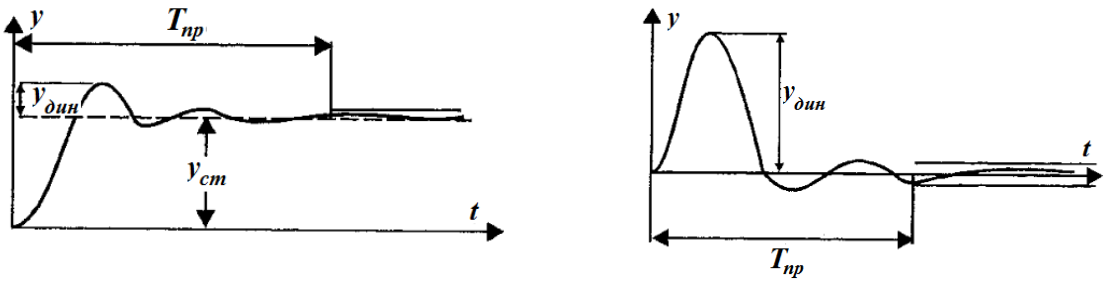

Рис. 1 – Графіки процесів автоматичного регулювання з оцінками їх якості
Fig. 1 – Graphs of automatic control processes with assessments of their quality

Якщо регульований об`єкт заданий, то оптимальна в даних конкретних умовах якість процесу регулювання досягається вибором типу регулятора, раціональним розміщенням його чутливих органів на об`єкті та настройкою цього регулятора, що враховує динамічні особливості об`єкта та регулятора.

Основні складнощі, що виникають при вирішенні питання щодо вибору оптимального налагодження регулятора у складних промислових системах автоматиного регулювання, полягають в тому, що, як правило, підвищення ступеня сталості і ступеня коливальності процесів може бути досягнуть тільки за рахунок зниження швидкості регулювання, тобто за рахунок збільшення динамічної та статичної похибок процесу.

Оскільки затухання процесу є першорядним критерієм якості процесу регулювання, то під оптимальним налагодженням автоматичного регулятора мається на увазі налагодження, що забезпечує задані значення ступеня коливальності та ступеня сталості процесу за мінімально можливими значеннями інших критеріїв якості.

Операторне рівняння складної лінійної системи автоматичного регулювання з однією регульованою величиною, рис.2, може бути представлено у доволі загальному вигляді (у припущенні, що об`єкт і регулятор є детектуючими ланками):

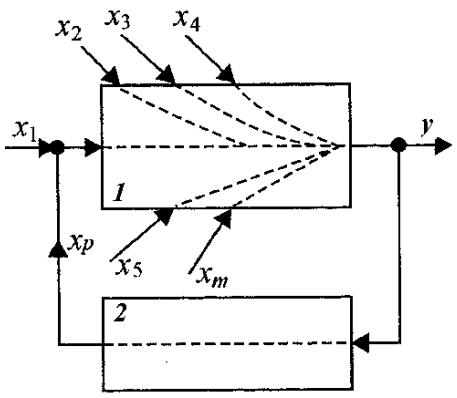

Рис. 2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання:
1 – регульований об`єкт, 2 – автоматичний регулятор
Fig. 2 – Block diagram of the automatic control system:
1 – controlled object, 2 – automatic controller

$$y(p)=\frac{W(p)}{1-W(p)}x_1(p)+\frac{W_2(p)}{1-W(p)}x_2(p)+\frac{W_3(p)}{1-W(p)}x_3(p)+...\frac{W_m(p)}{1-W(p)}x_m(p)+\frac{R(p)}{1-W(p)}, \qquad (1)$$

де *y(p)* – зображення відхилення регульованої величини;

$x_p(p)$ - зображення відхилення регулювального органу;

$x_1(p)$, $x_2(p)$, …, $x_m(p)$ - зображення збурюючих впливів (зовнішніх сигналів) на систему;

$W(p)=W_{об}(p)W_p(p)$ - передатна функція розімкненої системи по каналу для регулювальних впливів;

$W_{об}(p)=\frac{y(p)}{x_p(p)}$ - передатна функція регульованого об`єкту по каналу, що йде до точки відбору імпульсу регулятора від регулювального органу;

$W_p(p)=\frac{x_p(p)}{y(p)}$ - передатна функція регулятора по каналу, що йде від його чутливого елементу до регулювального органу;

$W_2(p)=\frac{y(p)}{x_2(p)}$, …, $W_m(p)=\frac{y(p)}{x_m(p)}$ - передатні функції розімкненої системи (джерело збурень може бути і в регуляторі) по каналам, що йдуть від точки відбору імпульсу для регулятора від джерел збурювальних впливів;

R(p) – член, що відображає вплив початкових умов; за нульовими початковими умовами *R(p) =0.*

Таким чином, форма процесу регулювання визначається динамічними характеристиками регульованого об`єкту і регулятора, формою збурюючих впливів, розташуванням їх осередків у системі автоматиного регулювання і початковими умовами.

Це ускладнює знаходження налаштувань системи автоматичного регулювання, що відповідають оптимальному процесу, особливо за допомогою «прямого» методу, тобто, шляхом безпосереднього інтегрування диференційних рівнянь системи. Дійсно, прямий метод для кожної комбінації вказаних факторів потребує виконання наступних операцій:

1) визначення коефіцієнтів диференційного рівняння;

2) розрахунок коренів p_1, p_2, …p_n характеристичного рівняння;

3) визначення початкових умов і постійних інтегрування;

4) побудова графіку перехідного процесу:

5) оцінка якості регулювання;

6) порівняння отриманих значень ступеня сталості *h*, ступеня коливальності *m*, динамічної $y_{дин}$ та статичної $y_{ст}$ похибок і тривалості процесу $T_{пр}$ з їх заданими значеннями.

Тому актуальними є методи, що дозволяють оцінити якість процесів регулювання з найменшими витратами часу та ресурсів на розрахунки.

Далі розглянемо методи розрахунку критеріїв якості, що характеризують затухання процесів регулювання, і найбільш прості способи оцінки регулювання за іншими критеріями якості.

Для наближеної оцінки якості процесів регулювання у багатьох випадках можуть бути використані різні інтегральні оцінки, або, як їх називають, інтегральні критерії якості. Головна перевага методів, де використовуються дані критерії, - відсутність необхідності рішення диференціальних рівнянь.

Простішим інтегральним критерієм є так званий лінійний критерій

$$I_1 = \int_0^\infty y(t)dt, \qquad (2)$$

який легко може бути знайдений безпосередньо з диференціального рівняння вільних коливань системи автоматичного регулювання

$$a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + ...a_1 y' + a_0 y = 0. \qquad (3)$$

Дійсно, проінтегруємо в інтервалі від 0 до ∞ обидві частини рівняння (3):

$$a_n \int_0^\infty y^n dt + a_{n-1} \int_0^\infty y^{n-1} dt + ...a_1 \int_0^\infty y' dt = 0. \qquad (4)$$

або

$$a_n \left[y^{n-1}(\infty) - y^{n-1}(0) \right] + a_{n-1} \left[y^{n-2}(\infty) - y^{n-2}(0) \right] + ... + a_1 \left[y(\infty) - y(0) \right] + a_1 I_1 = 0, \qquad (5)$$

але оскільки у сталій системі

$$y^n(\infty) = y^{n-1}(\infty) = ... = y'(\infty) = 0,$$

то

$$I_1 = \frac{a_n y^{n-1}(0) + a_{n-1} y^{n-2}(0) + ...a_1 y'(0) + a_0 y(0)}{a_0}. \qquad (6)$$

Якщо $y'(0) = y''(0) = ...y^{n-1}(0) = 0$ і $y(0) \neq 0$, тоді потрібний лінійний критерій має особливо простий вигляд

$$I_1 = \frac{a_1 y(0)}{a_0}. \qquad (7)$$

Цей критерій можна легко визначити, якщо відома амплітудно-фазова характеристика системи $K(i\omega)$ у замкнутому стані. Дійсно, перетворення Лапласа для *y(t)* має вигляд:

$$y(p) = \int_0^\infty y(t) e^{-pt} dt = K(p) x(p), \qquad (8)$$

де x(p) – зображення збурюючої функції,

K(p) – передатна функція системи.

Отже, потрібний критерій можна представити у такій формі:

$$I_1 = \int_0^\infty y(t)dt = \lim_{p \to \infty} y(p) = K(0)x(0). \qquad (9)$$

Інтеграл, що розглядається, можна представити як алгебраїчну суму площин, які описуються кривою регулювальної величини навколо її значення, що встановлюється при закінченні перехідного процесу (рис. 3). Якщо процес регулювання характеризується неколивальним характером (рис. 3, а), то чим скоріше відбувається процес, тим менше значення інтегралу I_1. Однак, ця відповідність порушується у випадку, якщо перехідний процес у системі носить коливальний характер і *y(t)* змінює свій знак, рис. (3, б). Загальна величина інтегралу I_1.у цьому випадку не можу служити задовільним критерієм якості регулювання; наприклад, I_1.= 0 для процесів із постійними амплітудами.

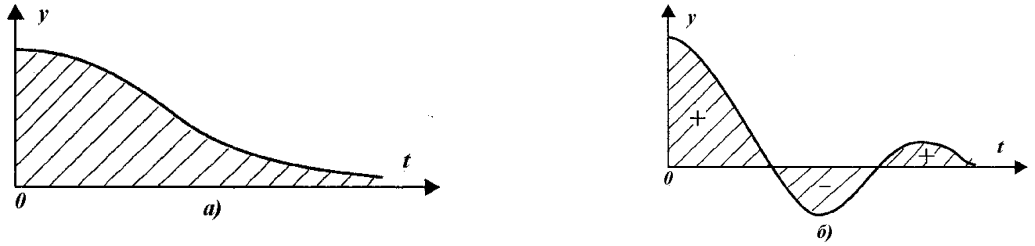

Рис. 3 – Перехідні процеси:
а – неколивальної форми, б – коливальної форми
Fig. 3 – Transient processes:
a – non-oscillatory form, b – oscillatory form

У деяких випадках оцінку якості проводять за допомогою квадратичного інтегрального критерію

$$I_2 = \int_0^\infty [y(t)]^2 dt . \qquad (10)$$

Цей критерій не має недоліків лінійного критерію та може бути просто розрахований, наприклад, за формулою Релея:

$$I_2 = \int_0^\infty [y(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi}\int_0^\infty |K(i\omega)|^2 |x(i\omega)|^2 d\omega , \quad (11)$$

де $x(i\omega)$ - спектр Фур'є збурюючої дії;

$K(i\omega)$ - амплітудно-фазова характеристика системи.

Результати

Як і у випадку лінійного критерія, якість процесу тим краще, чим менший квадратичний інтегральний критерій.

Квадратичний інтегральний критерій необхідний при оптимізації систем автоматичного регулювання параметрів, а також при кількісній оцінці їх економічної ефективності. Наприклад, максимальна довговічність роботи металу пароперегрівачів при регулюванні температури та тиску пари досягається у разі застосування інтегрального квадратичного критерію I_2.

Використання інтегральних критеріїв потребує обачності. Так, якщо виходити з мінімального значення інтегралу I_2, процеси А і Б на рис. 4 еквівалентні, а з двох процесів, зображених на рис. 5 кращим буде коливальний процес; з технологічної точки зору процеси А і Б різні, тому фахівець віддасть перевагу неколивальній формі, крива 2.

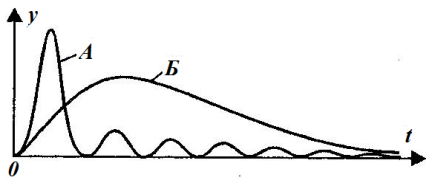

Рис. 4 – Два перехідні процеси, для яких інтегральна оцінка I_2 має одне й те ж значення

Fig. 4 – Two transient processes for which the integral estimate I2 has the same value

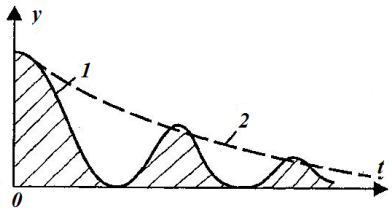

Рис. 5 – До оцінки перехідних процесів за допомогою інтегральних критеріїв якості

Fig. 5 – Toward the assessment of transient processes using integral quality criteria

Оскільки при оцінці якості технологічних процесів мінімум інтегральних критеріїв відповідає процесам зі зниженим значенням ступеня коливальності m (тобто процесам із поганим затуханням коливальних складових), то недоліки інтегральних критеріїв якості можуть бути у значній мірі компенсовані, якщо вони застосовуються не ізольовано, а разом з оцінками якості регулювання за ступенем коливальності m. За таким поєднанням критеріїв якості немає необхідності у розрахунках ступеня стійкості, оскільки достатньо велике її значення гарантується мінімумом використання інтегральної оцінки.

Найпростішим узагальненим інтегральним критерієм є

$$I_v = \int_0^\infty V(t)dt , \qquad (12)$$

де V(t) – квадратична форма від змінних, що характеризують стан системи, звичайно від вихідної величини $x_{вих}$ системи автоматичного регулювання та її похідних за часом.

$$I_v = \int_0^\infty \left\{ [x_{вих}]^2 + T_0^2 \left[\frac{dx_{вих}}{dt} \right]^2 \right\} dt . \quad (13)$$

Цей критерій має і самостійне значення, оскільки він часто застосовується замість квадратичного критерію.

Висновки

Інтегральні критерії дають змогу кількісно охарактеризувати поведінку системи у перехідних режимах, враховуючи не лише величину відхилення регульованої змінної, а й форму, тривалість та коливальний характер перехідного процесу. Лінійний критерій забезпечує швидку наближену оцінку, але є чутливим до зміни знаку помилки і може втрачати інформативність у коливальних системах. Квадратичний критерій позбавлений цього недоліку, оскільки враховує енергетичну складову відхилень та дозволяє застосовувати спектральні методи аналізу. Узагальнені критерії, що базуються на квадратичних формах стану, відіграють важливу роль у сучасних оптимізаційних методах, включно з варіаційними підходами та задачами оптимального керування.

Разом із тим мінімізація інтегральних критеріїв не завжди гарантує зниження коливальності або підвищення ступеня стійкості системи, що зумовлює необхідність їх поєднання з додатковими показниками, зокрема зі ступенем коливальності. Використання такого комплексного підходу дозволяє компенсувати недоліки окремих критеріїв і забезпечує більш повну та коректну оцінку якості регулювання у реальних технічних процесах.

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

Sahib, M. A. A new multi-objective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms / Sahib M. A., Ahmed B. S. // Journal of Advanced Research. – 2015. – № 115. – pp. 1–4. DOI : https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004

2. Özdemir M. T. Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control / M. T. Özdemir, D. Öztürk // Energies. – 2017. – № 10(12), article 2134. DOI : https://doi.org/10.3390/en10122134

3. Veronesi M. Deterministic Performance Assessment and Retuning of Industrial Controllers Based on Routine Operating Data: Applications / Veronesi M., Antonio Visioli A. // Processes. – 2015. – № 3(1). – Pp. 113-137. DOI : https://doi.org/10.3390/pr3010113

4. Pathak N. New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system / Pathak N., Bhatti T., Verma, A. // Sustainable Energy Grids and Networks. – 2016. DOI : https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.11.003

5. Seborg D. Process dynamics and control. Fourth edition / Seborg D., Edgar T., Mellichamp D. // Hoboken N. J., John Wiley, Sons Inc., 2016. – Available at: https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org_.pdf (Last accessed September 22, 2025)

6. Das S. A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices / Das S., Pan I. Gupta A. // Engineering applications of Artificial Intelligence. – 2012. DOI:10.1016/j.engappai.2011.10.004

7. Zhao Ch. Control of Nonlinear Uncertain Systems by Extended PID / Zhao Ch., Guo L. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2020. DOI : https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3030876

8. Sheng Yu. Proportional–Integral–Derivative Controller Performance Assessment and Retuning Based on General Process Response Data / Sheng Yu, Li X. // ACS Omega. – 2021. – № 6(15). – Pp. 10207–10223. DOI : https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00523

9. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Київ : Либідь, 2007. – 656 с. – Режим доступу : https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Dyachenko/0030987.pdf (дата звернення 22.09.2025)

10. Теорія автоматичного управління [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів спец. 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / уклад. : О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с. – Режим доступу : https://document.kdu.edu.ua/info_zab/141_1502.pdf (дата звернення 22.09.2025)

Отримано: 14.08.2025 Прийнято: 22.09.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]**T.M. 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/0000-0002-1423-0822
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

THE ROLE OF INTEGRAL QUALITY CRITERIA IN THE ASSESSMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS FOR COMPLEX ENERGY FACILITIES

The article examines the specific features of applying integral quality criteria to evaluate automatic control processes in energy systems. These complex technical systems are characterized by increased requirements for accuracy, stability, and energy efficiency, where the quality indicators of transient processes directly affect the reliability of equipment operation and the efficiency of technological processes. Traditional assessment methods based on solving differential equations or conducting a detailed analysis of transient characteristics are labor-intensive and insufficiently suitable for rapid diagnostics, which highlights the relevance of using integral criteria as simpler and more universal indicators. The study provides a systematic analysis of the most widespread integral criteria, including linear, quadratic, and generalized ones, and determines their applicability for evaluating different types of transient processes. The linear criterion is considered the simplest tool for rapid estimation of oscillation damping; however, its limitations in cases involving sign-changing control error and oscillatory dynamics are emphasized. The quadratic criterion eliminates this drawback and allows one to assess the energy component of deviations, making it effective for optimizing automatic control systems and comparing their economic efficiency. Generalized integral criteria based on quadratic forms of the state, which are widely used in optimal control tasks, are also examined. It is demonstrated that minimizing integral criteria does not always guarantee the achievement of the desired transient response, particularly regarding the degree of oscillation and steady-state behavior. Therefore, the study substantiates the feasibility of combining them with additional quality indicators, which prevents incorrect assessments and ensures a comprehensive approach to the analysis of automatic control system performance. The obtained results confirm the high practical value of integral criteria as a tool for fast and informative monitoring of control quality in energy and industrial systems.

Keywords: quality, assessment, integral criteria, automatic control.

In cites: Fursova T.M. (2025). The role of integral quality criteria in the assessment of automatic control systems for complex energy facilities. Engineering, (36), 51-59. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-05 (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. Sahib, MA & Ahmed, BS 2015, 'A new multi-objective performance criterion used in PID tuning optimization algorithms', *Journal of Advanced Research*, no 115, Pp. 1-4. DOI : https://doi.org/10.1016/j.jare.2015.03.004 (Last accessed September 22, 2025)

2. Özdemir, MT & Öztürk, D 2017, 'Comparative performance analysis of optimal PID parameters tuning based on the optics inspired optimization methods for automatic generation control', *Energies*, no 10(12), article 2134. DOI : https://doi.org/10.3390/en10122134 (Last accessed September 22, 2025)

3. Veronesi, M & Antonio Visioli, A 2015, 'Deterministic Performance Assessment and Retuning of Industrial Controllers Based on Routine Operating Data: Applications', *Processes*, no 3(1), Pp. 113-137. DOI : https://doi.org/10.3390/pr3010113 (Last accessed September 22, 2025)

4. Pathak, N, Bhatti, T & Verma, A 2016, 'New performance indices for the optimization of controller gains of automatic generation control of an interconnected thermal power system', *Sustainable Energy Grids and Networks*. DOI : https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.11.003 (Last accessed September 22, 2025)

5. Seborg, D, Edgar, T & Mellichamp, D 2016, 'Process dynamics and control', in Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, Inc., viewed <https://elmoukrie.com/wp-content/uploads/2022/06/process-dynamics-and-control-dale-e.-seborg-thomas-f.-edgar-etc.-z-lib.org_.pdf> (Last accessed September 22, 2025)

6. Das, S, Pan, I & Gupta, A 2012, 'A novel fractional order fuzzy PID controller and its optimal time domain tuning based on integral performance indices', *Engineering applications of Artificial Intelligence*. DOI: 10.1016/j.engappai.2011.10.004 (Last accessed September 22, 2025)

7. Zhao, Ch & Guo, L 2020, 'Control of Nonlinear Uncertain Systems by Extended PID', *IEEE Transactions on Automatic Control*. DOI : https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3030876 (Last accessed September 22, 2025)

8. Sheng, YuLiX 2021, 'Proportional–Integral–Derivative Controller Performance Assessment and Retuning Based on General Process Response Data', *ACS Omega*, no 6(15), 10207–10223. DOI : https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00523 (Last accessed September 22, 2025)

9. Popovych, MH & Kovalchuk, OV 2007, *Teoriia avtomatychnoho keruvannia* [Automatic control theory], Lybid. Kyiv. (in Ukraine)

10. Shtifzon, OY, Novikov, PV & Bun, VP 2020, *Teoriia avtomatychnoho upravlinnia* [Automatic control theory], Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Kyiv. (in Ukraine)

Submission received: 08/14/2025 Accepted: 09/22/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06
УДК 621.65:681.5

[1]В. А. ДРОЗД,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: volodyadrozd2296@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4335-7558
[1]Ю. О. КРАМАРЕНКО,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kramarenkoura@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1937-9756
[1]Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОТУЖНИХ НАСОСІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

У статті досліджується проблема підвищення показників якості роботи потужних насосних агрегатів електростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування. Насоси великої потужності (більше 1 МВт) є критичними елементами енергетичної інфраструктури, що забезпечують роботу циркуляційних, живильних та охолоджувальних контурів. Нестабільність їх функціонування, затягнуті перехідні процеси та надмірні динамічні навантаження призводять до зниження енергоефективності, зростання експлуатаційних витрат і скорочення ресурсу обладнання. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення алгоритмів керування для забезпечення стабільного та економічного режиму роботи насосів в умовах змінних навантажень і високих вимог до надійності. У роботі сформовано математичну модель потужного насоса, що включає напірні, енергетичні та потужнісні характеристики, а також динамічні рівняння другого порядку, які описують взаємодію насоса та електроприводу. На основі моделювання досліджено вплив параметрів ПІД-регулятора на динаміку системи й визначено інтегральні критерії якості (ISE, IAE, ITAE). Наведено результати порівняння оптимізованих і неоптимальних налаштувань, які демонструють суттєве зменшення перерегулювання, скорочення часу перехідного процесу та зниження інтегральних помилок у 1,7–7 разів.

Побудовані напірні, енергетичні та потужнісні характеристики реального насоса потужністю 2000 кВт, а також графіки перехідних процесів і енергетичних показників для різних режимів керування. Запропоновано комплексний показник якості, що поєднує динамічні та енергетичні критерії. Отримані результати підтверджують ефективність оптимізації ПІД-регулятора та можуть бути використані при модернізації систем керування насосами електростанцій, підвищенні їхньої надійності та енергоефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, енергоефективність, електростанція, насосні установки, система керування.

Як цитувати: Дрозд В. А., Крамаренко Ю. О. Підвищення показників якості потужних насосів електростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 60-69. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06

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

Потужні насосні агрегати є ключовими елементами інфраструктури теплових та атомних електростанцій. Від стабільності їхнього функціонування залежить робота систем теплоносія, градирень, деаераційних і циркуляційних контурів. Неоптимальна робота систем керування призводить до надлишкових енергетичних витрат, зростання вібрацій, погіршення динаміки та зменшення ресурсу обладнання.

Складність задачі зумовлена нелінійністю характеристик насосів та приводів, наявністю інерційних ланок, варіативністю навантажень і зношуванням елементів. Саме тому особливої актуальності набуває розроблення математично обґрунтованих методів оптимізації ПІД-регуляторів, що дозволяють поліпшити якість керування, підвищити ККД агрегатів та зменшити витрати електроенергії.

© Дрозд В. А., Крамаренко Ю. О.

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання підвищення ефективності та надійності потужних насосних агрегатів теплових та атомних електростанцій посідає важливе місце у сучасних дослідженнях з енергетики та автоматизації. У працях українських дослідників розглядаються особливості гідравлічних характеристик насосів великої потужності, вплив режимів експлуатації на напір, подачу та кавітаційні запасі [1–3]. Наголошується, що саме форма напірної характеристики та її чутливість до зміни частоти обертання визначають можливості реалізації енергоефективного регулювання.

У роботах, присвячених теорії автоматичного керування [4–6], детально аналізуються властивості ПІД-регуляторів, питання стійкості замкнених систем та вибору параметрів за інтегральними критеріями. Показано, що для інерційних об'єктів другого порядку, до яких належать електроприводні насосні установки, неправильний вибір коефіцієнтів призводить до значних перерегулювань, затягнутих перехідних процесів і підвищених динамічних навантажень на механічні вузли. Окремі дослідження зосереджені на використанні частотних перетворювачів і векторного керування, що забезпечують гнучку зміну частоти обертання та дозволяють узгоджувати робочу точку насоса з оптимальним діапазоном ККД [7–9].

Суттєву увагу приділено питанням формалізованої оцінки якості регулювання. У низці робіт розглядається застосування інтегральних критеріїв ISE, IAE та ITAE для порівняння різних варіантів налаштування регуляторів і вибору їх оптимальних параметрів [10–12]. Показано, що критерій ITAE є особливо чутливим до тривалих відхилень і доцільний для об'єктів із великими енерговитратами, де затягнуті перехідні процеси призводять до відчутних економічних втрат. У публікаціях, присвячених енергозбереженню в насосних системах, обґрунтовано необхідність комплексного підходу, який поєднує гідравлічну оптимізацію, вибір високоефективних приводів та вдосконалення алгоритмів автоматичного керування [13, 14].

У роботах з математичного моделювання гідравлічних систем [15] запропоновано універсальні моделі другого порядку з урахуванням інерційності потоку, пружності трубопроводів та динаміки електроприводу. Такі моделі є придатними для чисельного аналізу перехідних процесів і налаштування ПІД-регуляторів за інтегральними критеріями. Разом з тим, у наявних публікаціях недостатньо висвітлено специфіку оптимізації систем керування саме для потужних насосів теплових та атомних (5–8 МВт) з урахуванням їх напірних, енергетичних та потужнісних характеристик. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на побудову узагальненої моделі такого агрегату та кількісну оцінку виграшу від оптимізації параметрів ПІД-регулятора за інтегральними й комплексними показниками якості.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи – підвищення показників якості потужних насосів теплових і атомних електростанцій шляхом оптимізації параметрів ПІД-регулятора на основі математичного моделювання динаміки та енергетики агрегату.

Завдання дослідження:

1. Побудувати математичну модель насоса великої потужності.
2. Сформувати напірні, енергетичні та потужнісні характеристики насосу.
3. Розробити динамічну модель «насос-привід» другого порядку.
4. Виконати моделювання ПІД-регулятору для оптимальних та не оптимальних налаштувань.
5. Розрахувати критерії ISE, IAE, ITAE.
6. Обчислити комплексний показник якості.
7. Провести порівняльний аналіз ефективності різних режимів керування

Виклад основного матеріалу

1. Об'єкт дослідження та припущення моделі

Як об'єкт дослідження розглядається потужний відцентровий насос з електроприводом номінальною потужністю $P_{ном}$=2000 кВт. Насос працює у складі циркуляційної або живильної системи, а його режим задається зміною частоти обертання електропривода за допомогою системи автоматичного керування.

Для побудови математичної моделі приймаються такі припущення:

- робоче середовище – рідина з практично сталою густиною (вода);
- робоча точка знаходиться в околі номінального режиму, що дозволяє лінеаризувати динамічні рівняння;
- динаміка системи «насос–електропривод–гідравлічна частина» описується моделлю другого порядку з єдиною вхідною координатою (керувальний вплив) та вихідною координатою (регульований параметр – подача або напір).

2. Статичні характеристики насосу

Напірна характеристика.

У спрощеному вигляді напірна характеристика (рис. 1) відцентрового насоса в околі номінального режиму описується квадратичною залежністю:

$$H(Q) = H_0 - kQ^2, \tag{1}$$

де $H(Q)$ – напір, м; Q – подача насоса, м³/с; H_0 – напір при нульовій подачі (закритій засувці), м; k – коефіцієнт крутизни напірної характеристики, що визначається за паспортними даними.

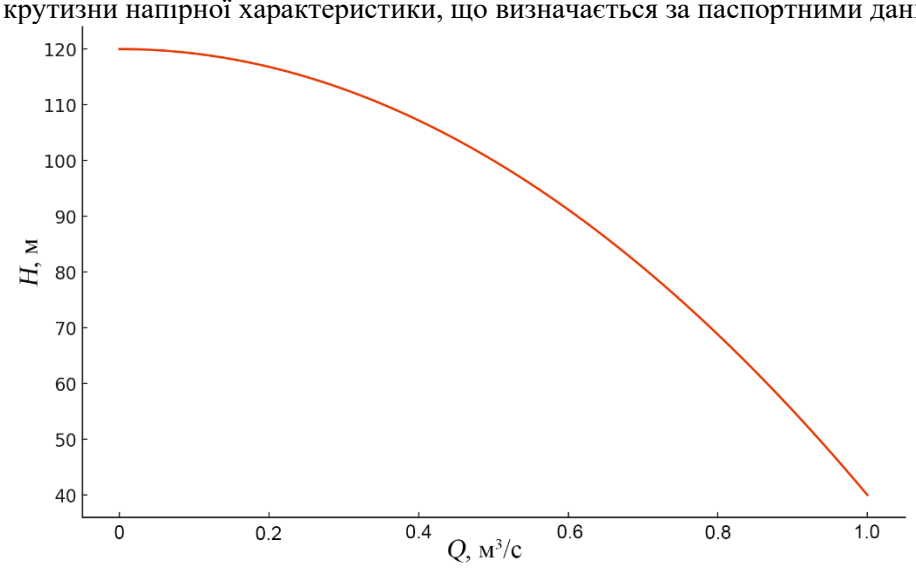

Рис. 1 – Напірна характеристика насосу
Fig. 1 – Pump pressure characteristic

Енергетична характеристика. Коефіцієнт корисної дії насоса як функція подачі приймається у вигляді «дзвоноподібної» залежності (рис. 2):

$$\eta(Q) = \eta_{\max} \exp\left[-\frac{\left(Q - Q_{\text{opt}}\right)^2}{2\sigma^2}\right], \tag{2}$$

де $\eta_{\max}$ – максимальний ККД у точці оптимальної подачі Q_{opt}; σ – параметр, що характеризує ширину області високого ККД. Потужнісна характеристика.

Споживана потужність при сталому режимі визначається (рис. 3):

$$P(Q) = \frac{\rho g Q H(Q)}{\eta(Q)}, \tag{3}$$

де ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Для нормування й порівняння режимів в роботі використовується відносна потужність та відносна подача (поділені на номінальні значення).

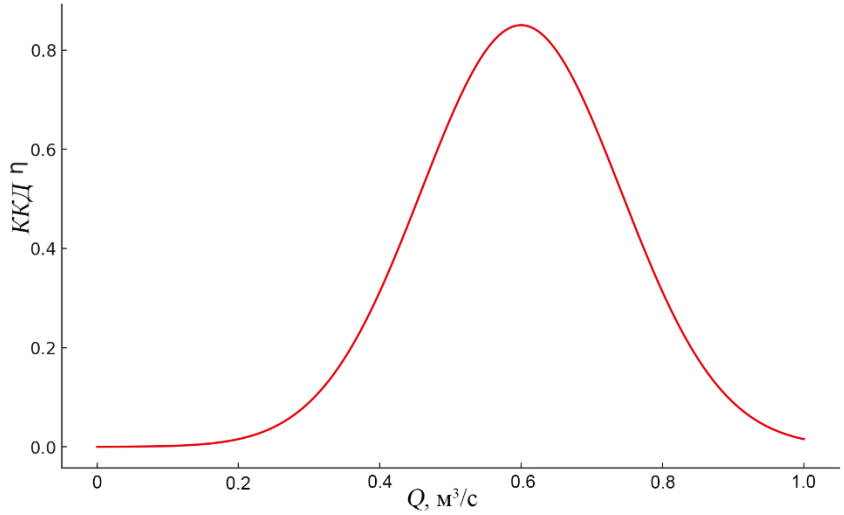

Рис. 2 – Характеристика ККД насосу
Fig. 2 – Pump efficiency characteristics

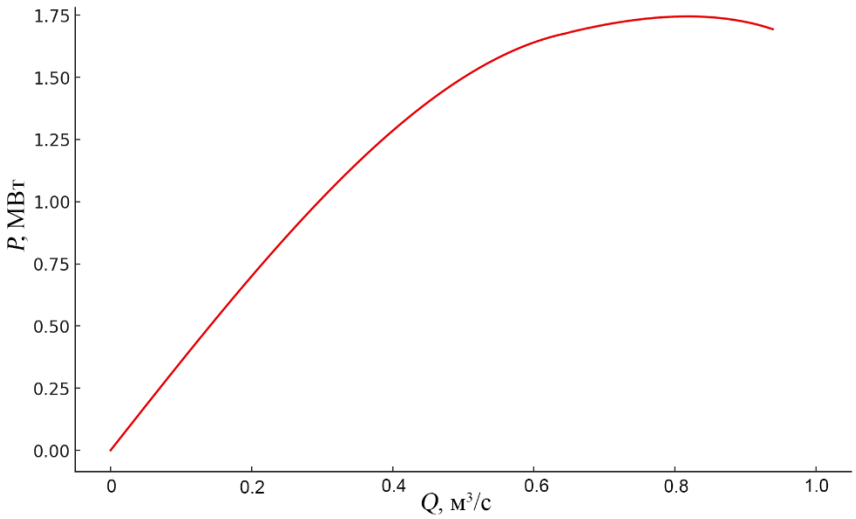

Рис. 3 – Характеристика потужності насосу
Fig. 3 – Pump power characteristics

3. Динамічна модель системи «насос–електропривод»

Динаміка системи в околі робочої точки описується лінеаризованою моделлю другого порядку:

$$\ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) = K \cdot u(t), \qquad (4)$$

де $y(t)$ – вихідна координата (відхилення подачі або напору від заданого значення); $u(t)$ – вхідний сигнал керування (наприклад, відносна зміна частоти обертання електропривода); a – коефіцієнт, що характеризує сумарне «дисипативне» (демпфувальне) тертя та втрати; b – «жорсткість» системи, пов'язана з гідравлічними й механічними властивостями; K – коефіцієнт підсилення каналу «керування – вихідний параметр».

У операторній формі (за Лапласом) передатна функція об'єкта має вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K}{p^2 + ap + b}. \qquad (5)$$

Таким чином, система є інерційною ланкою другого порядку з коефіцієнтом підсилення K, а параметри a, b визначають швидкодію та ступінь коливальності.

4. Модель ПІД-регулятора

Для регулювання параметра y(t) застосовується ПІД-регулятор:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^T e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

де $e(t)=y_{зад}(t)-y(t)$ – похибка регулювання; K_P, K_I, K_D – пропорційна, інтегральна та диференціальна складові відповідно.

В операторній формі:

$$W_{ПІД}(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + K_D \cdot p. \quad (7)$$

Замкнена система утворюється шляхом з'єднання $W_{ПІД}(p)$ і $W_{об}(p)$ в контурі з одиничним зворотним зв'язком. Перехідні процеси при оптимальному (K_P=8,0; K_I=1,2; K_D=0,2) та неоптимальному (K_P=2,0; K_I=0,1; K_D=0,01) налаштуванні ПІД-регулятору наведені на рис. 4.

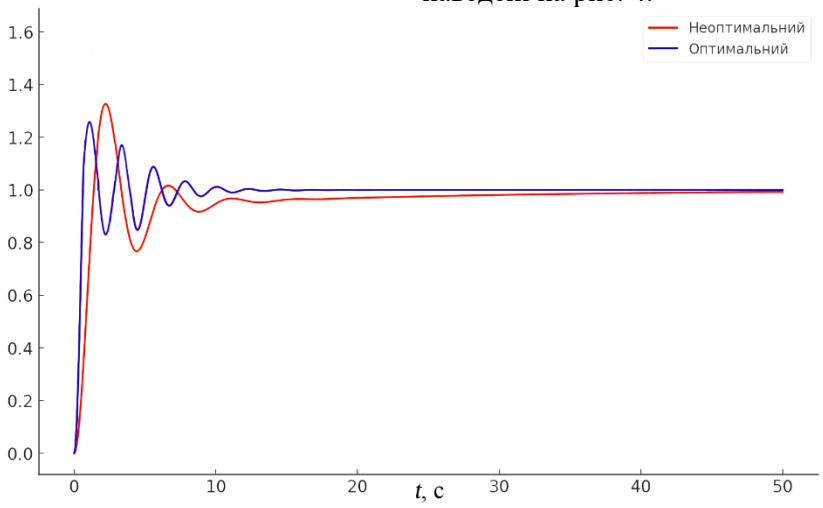

Рис. 4 – Перехідні характеристики насосу
Fig. 4 – Pump transient characteristics

5. Інтегральні критерії якості

Для кількісної оцінки якості перехідних процесів використано три класичні інтегральні критерії:

Інтеграл квадрата похибки (ISE):

$$\mathrm{ISE} = \int_0^T e^2(t)dt; \quad (8)$$

Інтеграл абсолютної похибки (IAE):

$$\mathrm{IAE} = \int_0^T |e(t)|dt; \quad (9)$$

Інтеграл абсолютної похибки, зважений за часом (ITAE):

$$\mathrm{ITAE} = \int_0^T t|e(t)|dt, \quad (10)$$

де T – тривалість спостереження перехідного процесу.

За результатами моделювання отримано такі значення для перехідного процесу при одиничному стрибку завдання:

Неоптимальний ПІД-регулятор:
$\mathrm{ISE}_{неопт}$=0,8240;
$\mathrm{IAE}_{неопт}$=2,6602;
$\mathrm{ITAE}_{неопт}$=25,9828.

Оптимізований ПІД-регулятор:
$\mathrm{ISE}_{опт}$=0,6291;
$\mathrm{IAE}_{опт}$=1,5271;
$\mathrm{ITAE}_{опт}$=3,6154.

6. Комплексний показник якості

Для зручності порівняння різних варіантів налаштування регулятора введемо безрозмірний комплексний показник якості K_Σ, який враховує одночасно три критерії ISE, IAE, ITAE.

Спочатку нормуємо кожен критерій відносно «базового» (неоптимального) варіанту:

$$\mathrm{ISE}^* = \frac{\mathrm{ISE}}{\mathrm{ISE}_{\text{норм}}};\ \mathrm{IAE}^* = \frac{\mathrm{IAE}}{\mathrm{IAE}_{\text{норм}}};\ \mathrm{ITAE}^* = \frac{\mathrm{ITAE}}{\mathrm{ITAE}_{\text{норм}}}. \quad (11)$$

Для оптимального режиму отримуємо:

$$\mathrm{ISE}^* = \frac{\mathrm{ISE}_{\text{опт}}}{\mathrm{ISE}_{\text{норм}}} = \frac{0,6291}{0,8240} = 0,76;$$

$$\mathrm{IAE}^* = \frac{\mathrm{IAE}_{\text{опт}}}{\mathrm{IAE}_{\text{норм}}} = \frac{1,5271}{2,6602} = 0,57; \quad , (12)$$

$$\mathrm{ITAE}^* = \frac{\mathrm{ITAE}_{\text{опт}}}{\mathrm{ITAE}_{\text{норм}}} = \frac{3,6154}{25,9828} = 0,14.$$

Далі формуємо узагальнений інтегральний функціонал:

$$J = w_1\mathrm{ISE}^* + \mathrm{IAE}^* + w_3\mathrm{ITAE}^*, \quad (12)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість кожного критерію ($w_1+w_2+w_3=1$).

У даній роботі прийнято: $w_1=0,3$, $w_2=0,3$, $w_3=0,4$.

Для неоптимального варіанту:

$$J_{\text{неопт}} = 0,3\cdot 1 + 0,3\cdot 1 + 0,4\cdot 1 = 1. \quad (13)$$

Для оптимального варіанту:

$$J_{\text{неопт}} = 0,3\cdot 0,76 + 0,3\cdot 0,57 + 0,4\cdot 0,14 = \\ = 0,228 + 0,172 + 0,056 = 0,456. \quad (14)$$

Тоді комплексний показник якості визначимо як:

$$K_\Sigma = \frac{1}{J}. \quad (15)$$

Отже, для неоптимального регулятору:

$$K_\Sigma^{\text{неопт}} = \frac{1}{J_{\text{неопт}}} = 1; \quad (16)$$

для оптимізованого регулятору:

$$K_\Sigma^{\text{опт}} = \frac{1}{0,456} = 2,19. \quad (17)$$

Таким чином, комплексний показник якості для оптимального ПІД-регулятора приблизно в 2,2 рази вищий, ніж для неоптимального, що кількісно відображає суттєве покращення динамічних властивостей системи та зменшення інтегральних втрат.

Обговорення результатів

Порівняльний аналіз демонструє, що оптимальний ПІД-регулятор забезпечує помітно кращі динамічні властивості системи. Зменшення ISE свідчить про скорочення сумарної квадратичної похибки, IAE – про зменшення відхилень від заданої траєкторії, ITAE – про зниження тривалості коливань. Фактично, ITAE зменшився у 7 разів, що є ключовим показником для потужних насосів, оскільки затяжні коливання призводять до збільшення навантаження на підшипники, вали та електропривод. Оптимізація регулятора забезпечує також зниження споживаної потужності за рахунок більш точного потрапляння в оптимум ККД насоса, зменшення надлишкових режимів і уникнення перевантажень.

Висновки

Розроблено комплексну модель насоса потужністю 2 МВт, що включає гідравлічні, енергетичні та динамічні характеристики. 2. Виконано моделювання процесів регулювання подачі з використанням ПІД-регулятора. 3. Встановлено, що оптимальне налаштування ПІД-регулятора дозволяє зменшити інтегральні помилки у 1,7–7 разів. 4. Отримані результати підтверджують доцільність модернізації систем керування потужними насосними агрегатами з використанням оптимізаційних алгоритмів. 5. Запропонована методика може бути використана для підвищення енергоефективності насосних систем теплових і атомних електростанцій.

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. Матвійчук В. А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: Монографія / В. А. Матвійчук, Н. Р. Веселовська, С. А. Шаргородський. – Вінниця, 2021. – 193 с. – Режим доступу : http://repository.vsau.org/getfile.php/29057.pdf (дата звернення 24.09.2025)

2. Лисяк В. Г. Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням / В. Г. Лисяк, М. Й. Олійник // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – Вип. (42). – С. 113-121. DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665.

3. Мовчан С. І. Алгоритм імітаційної моделі функціонування насосної станції підкачування зрошуваних меліорацій / С. І. Мовчан // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2019. – Вип. 19, т. 4. – С. 245-252. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-245-252

4. Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve / W. G. Zhang, W. D. Yang, F. X. Dou, L. J. Wang // Petrochemical Equipment. – 2016. – Vol. 45, № 6. – P. 73-76. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016

5. Ogata K. Modern Control Engineering – Upper Saddle River / Ogata K. – Prentice Hall, 2010. – 912 p. – Access mode : https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf (Last accessed September 24, 2025)

6. Nise N. S. Control Systems Engineering / Nise N. S. – Hoboken : Wiley, 2019. – 1030 p. – Access mode : https://gnindia.dronacharya.info/EEE/5thSem/Downloads/ControlSystem/Books/CONTROL-SYSTEM-REFERENCE-BOOK-2.pdf (Last accessed September 24, 2025)

7. Xu P. Design of Monitoring and Control System of Hydraulic Pump Station Based on Internet of Things / P. Xu & S. Zhang // Advancing Computing as a Science & Profession. – 2025. – Vol. 59. – P. 340-348. DOI: 10.3103/S0146411625700506

8. Dynamic Modelling of Centrifugal Hydraulic Load of Pumping Station Electric Drive / V. Lysiak et al. // JEECS. – 2019. – Vol. 5, no 1. – P. 1-8. DOI: 10.23939/jeecs2019.01.001

9. Modelling flow and pressure controlled pump stations with application to optimal pump scheduling // Sylvan Elhay, Michael Fischer, Olivier Piller, Jochen Deuerlein, Angus Ross Simpson // Cambridge Prisms: Water. – 2025. – № 3. – P. 1-14. DOI: 10.1017/wat.2025.10005

10. Derakhshan S. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation / S. Derakhshan, A. Nourbakhsh // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2008. – Vol. 32, no 8. – P. 1620-1627.

11. Шудрик О. Л. Підвищення ефективності використання відцентрових насосів за рахунок вдосконалення математичних моделей робочого процесу : дис. ... канд. техн. наук:

спец. 05.05.17 / О. Л. Шудрик ; НТУ «ХПІ». – Харків, 2018. – 184 с. – Режим доступу : https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/d72c2df3-e451-4018-b181-fe90a3c53b9b/content (дата звернення 24.09.2025)

12. Копей Б. В. Контроль технічного стану та підвищення ресурсу штангової свердловинної насосної установки : монографія / Копей Б. В., Лопатін В. В., Копей І. Б. // Нафтогазове обладнання : у 11 т. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. – Т. 11. – 378 с.

13. Increasing Energy Efficiency in Water CollectionSystems by Submersible PMSM Well Pumps / M. Beck, A. Sperlich, R. Blank, E. Meyer, R. Binz, M. Ernst // Water. – 2018. – № 10(10):1310. DOI:10.3390/w10101310

14. Hydraulic Institute Standards for Rotodynamic Pumps. – New York : Hydraulic Institute, 2019. – 560 p. – Access mode : https://www.pumps.org/ (Last accessed September 24, 2025)

15. Сільвестров А. М. Методи дослідження електротехнічних комплексів і систем [Електронний ресурс] : монографія / М. Я. Островерхов, А. М. Сільвестров, К. Х. Зеленський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : Талком, 2019. – 301 с. – Режим доступу : https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47969 (дата звернення 24.09.2025)

Отримано: 18.08.2025 Прийнято 24.09.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]V. DROZD,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: volodyadrozd2296@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-4335-7558
[1]Y. KRAMARENKO,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: kramarenkoura@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-1937-9756
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.

IMPROVING THE QUALITY PERFORMANCE OF HIGH-POWER ELECTRIC POWER PLANT PUMPS THROUGH OPTIMIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The article examines the problem of improving the quality performance of high-power pump units at electric power plants through the optimization of automatic control systems. High-power pumps (over 1 MW) are critical components of the energy infrastructure, ensuring the operation of circulation, feedwater, and cooling circuits. Instability of their functioning, prolonged transient processes, and excessive dynamic loads lead to reduced energy efficiency, increased operational costs, and shortened equipment lifetime. The relevance of the study is determined by the need to improve control algorithms in order to ensure stable and efficient pump operation under variable loads and stringent reliability requirements.

The paper presents a mathematical model of a high-power pump, which includes head-flow, energy, and power characteristics, as well as second-order dynamic equations describing the interaction between the pump and the electric drive. Based on simulation, the influence of PID controller parameters on system dynamics is investigated, and integral quality criteria (ISE, IAE, ITAE) are evaluated. The obtained results demonstrate significant reductions in overshoot, shorter transient response times, and a decrease in integral errors by a factor of 1.7–7 when applying optimized controller settings compared to non-optimized ones.

Head, energy, and power characteristics of a real 2000 kW pump are constructed, along with transient response plots and energy performance diagrams for different control modes. A comprehensive quality index combining dynamic and energy-efficiency criteria is proposed. The results confirm the effectiveness of PID controller optimization and can be used for modernization of pump control systems at power plants to enhance their reliability and energy efficiency.

Keywords: quality indicators, energy efficiency, power plant, pumping units, control system.

In cites: Drozd V., Kramarenko Y. (2025), Improving the quality performance of high-power electric power plant pumps through optimization of automatic control systems. *Engineering, (36),* 60-69. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06 (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. Matvijchuk, VA, Veselovska, NR & Shargorodskij, SA 2021, *Matematichne modelyuvannya novitnih tehnologichnih sistem* [Mathematical modeling of advanced technological systems], Vinnicya: 2021. – 193 p. ISBN 978-966-949-855-7 http://repository.vsau.org/getfile.php/29057.pdf (in Ukraine)

2. Lisyak, VG & Olijnik, MJ 2021, 'Modeling dynamic operating modes of an asynchronous electric drive with centrifugal pump load', *Visnik Priazovskogo Derzhavnogo Tehnichnogo Universitetu. Seriya: Tehnichni nauki*, iss. (42), Pp. 113-121. DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665. (in Ukraine)

3. Movchan, SI 2019, 'Algorithm of a simulation model of the functioning of a pumping station for pumping irrigated land reclamation', *Praci TDATU*, iss. 19, vol. 4, Pp. 245-252. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-245-252 (in Ukraine)

4. Zhang, WG, Yang, WD, Dou, FX & Wang, LJ 2016, 'Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve', *Petrochemical Equipment*, Vol. 45, no 6, Pp. 73-76. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016 (Last accessed September 24, 2025)

5. Ogata, K 2010, *Modern Control Engineering. – Upper Saddle River*. viewed <https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf> (Last accessed September 24, 2025)

6. Nise, NS 2019, *Control Systems Engineering,* viewed < https://gnindia.dronacharya.info/EEE/5thSem/Downloads/ControlSystem/Books/CONTROL-SYSTEM-REFERENCE-BOOK-2.pdf > (Last accessed September 24, 2025)

7. Xu, P & Zhang, S 2025, 'Design of Monitoring and Control System of Hydraulic Pump Station Based on Internet of Things', *Advancing Computing as a Science & Profession*, Vol. 59, P. 340-348. DOI: 10.3103/S0146411625700506

8. Lysiak, V et al 2019, 'Dynamic Modelling of Centrifugal Hydraulic Load of Pumping Station Electric Drive', *JEECS*, Vol. 5, no 1, P. 1-8. DOI: 10.23939/jeecs2019.01.001 (in Ukraine)

9. Elhay, S, Fischer, M, Fischer, O, Deuerlein, J & Simpson, AR 2025, 'Modelling flow and pressure controlled pump stations with application to optimal pump scheduling', *Cambridge Prisms: Water*, no 3, P. 1-14. DOI: 10.1017/wat.2025.10005

10. Derakhshan, S & Nourbakhsh, A 2008, 'Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation', *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, no. 8, P. 1620-1627.

11. Shudrik, OL 2018, 'Pidvishennya efektivnosti vikoristannya vidcentrovih nasosiv za rahunok vdoskonalennya matematichnih modelej robochogo procesu' [Increasing the efficiency of centrifugal pumps by improving mathematical models of the workflow], kand. tehn. n. thesis, NTU «HPI», Harkiv. (in Ukraine)

12. Kopej, BV, Lopatin, VV & Kopej, IB 2020, *Kontrol tehnichnogo stanu ta pidvishennya resursu shtangovoyi sverdlovinnoyi nasosnoyi ustanovki* [Control of technical condition and increase of resource of the rod drilling pump installation], Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2020. – 378 s. ISBN 978-966-694-349-4 (in Ukraine)

13. Beck, M, Sperlich, A, Blank, R, Meyer, E, Binz, R & Ernst, M 2018, 'Increasing Energy Efficiency in Water CollectionSystems by Submersible PMSM Well Pumps', Water, no 10(10), 1310. DOI:10.3390/w10101310

14. Hydraulic Institute Standards for Rotodynamic Pumps, 2019, New York: Hydraulic Institute, 2019. – 560 p., viewed https://www.pumps.org/ (Last accessed September 24, 2025)

15. Silvestrov, AM, Silvestrov, AM & Zelenskij, KH 2019, *Metodi doslidzhennya elektrotehnichnih kompleksiv i sistem* [Methods of research of electrical complexes and systems], Talkom, Kiyv. (in Ukraine)

Submission received: 08/18/2025 Accepted: 09/24/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07
УДК 621.311.21:681.5.015.23

[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]**С. С. ПРИДВОРОВ**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: spridv@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5164-4997
[1]*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,*
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ МАЛИХ ГЕС ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглянуто проблему підвищення комплексних показників якості роботи малих гідроелектростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування гідроагрегатами. Показано, що в умовах зростання частки децентралізованих джерел генерації та підвищених вимог до енергоефективності особливого значення набуває якість динамічних процесів, що формуються під час зміни навантаження мГЕС. Для вирішення зазначеної проблеми запропоновано підхід до оптимізації параметрів ПІД-регулятора системи автоматичного регулювання обертання гідротурбіни на основі моделювання її динаміки у вигляді об'єкта другого порядку з типовими часами гідравлічних та електромеханічних ланок. Як об'єкт дослідження використано модель гідротурбіни Френсіса малої потужності з номінальними параметрами: нетто-напір 74 м, витрата 2,05 м³/с та номінальна потужність близько 1,28 МВт. Наведено напірні, енергетичні та потужнісні характеристики турбіни, отримані в узагальненому вигляді. Проведено імітаційні дослідження реакції гідротурбіни на стрибкові зміни навантаження для двох варіантів налаштування ПІД-регулятора – неоптимального та оптимального. Виконано кількісну оцінку якості перехідних процесів за інтегральними критеріями якості за похибкою та часом, а також за показниками енергетичної ефективності, включаючи відносні втрати виробленої енергії у перехідному режимі. Показано, що оптимальне налаштування ПІД-регулятора дозволяє істотно зменшити амплітуду та тривалість коливань, прискорити усталення режиму та скоротити втрати енергії з 12,9 % до 2,1 %. Запропоновано комплексний показник якості, що узагальнює динамічні та енергетичні критерії й може бути використаний як універсальна метрика для порівняння різних законів регулювання. Отриманий результат підтверджує доцільність оптимізації систем керування як одного з найефективніших шляхів підвищення продуктивності та надійності малих ГЕС.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, гідротурбіни, енергозбереження, системи керування, оптимізація

Як цитувати: Мезеря А. Ю., Придворов С. С. Підвищення показників якості малих ГЕС шляхом оптимізації систем керування. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 70-80. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07

© Мезеря А. Ю., Придворов С. С. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

Мала гідроенергетика розглядається як один з ключових напрямів розвитку відновлюваної енергетики в Європі та Україні, забезпечуючи децентралізоване електропостачання, підтримку енергетичної безпеки та зменшення викидів CO_2 [4-8, 14]. Для мГЕС особливо актуальними є:

- стабілізація частоти й напруги в умовах змінного навантаження;
- максимізація ККД гідроагрегату в широкому діапазоні режимів;
- мінімізація механічних навантажень та кавітаційних явищ у гідротурбінах;
- забезпечення надійної роботи в автономних та ізольованих мережах [2, 3, 5].

Якість цих властивостей безпосередньо визначається характеристиками системи керування гідротурбіною та системою автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) (САРЧ, сервоприводами напрямного апарата, системою збудження тощо) [2, 12-15]. Відсутність оптимізації параметрів ПІД-регуляторів призводить до тривалих перехідних процесів, перевищення допустимих відхилень частоти та втрат енергії, що критично для малих потужностей. Отже, виникає науково-практичне завдання розроблення підходів до оцінювання і підвищення комплексних показників якості мГЕС шляхом оптимізації систем керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика підвищення ефективності та якості роботи малих гідроелектростанцій активно розглядається як у міжнародних, так і в українських науково-технічних джерелах. У фундаментальних роботах, присвячених гідродинамічному проектуванню та підбору гідротурбін для малих ГЕС, детально розглянуто питання формування напірних, енергетичних та потужнісних характеритик турбін та пропелерних агрегатів, а також наведено практичні рекомендації щодо вибору їх геометричних параметрів і режимів роботи [1, 3, 5]. Ці праці формують теоретичну основу для побудови математичних моделей гідроагрегатів, які застосовуються надалі для аналізу динаміки й синтезу систем керування.

У дослідженнях, присвячених розвитку малої гідроенергетики, значну увагу приділено техніко-економічним аспектам впровадження мГЕС, аналізу їх потенціалу в енергетичних системах та оцінці бар’єрів, пов’язаних із мережевими приєднаннями, нормативною базою й інвестиційною привабливістю [4, 6-8]. У цих роботах підкреслюється, що для підвищення конкурентоспроможності малих ГЕС необхідно не лише оптимізувати гідротехнічні споруди та гідромеханічне обладнання, а й забезпечити високий рівень автоматизації та якості регулювання режимів роботи.

Україномовні джерела з гідравлічних машин і гідроелектричних станцій містять систематизований виклад теорії гідротурбін, методики їх розрахунку, побудову регулювальних та експлуатаційних характеристик, а також питання взаємодії турбіни з електричною частиною станції [9-11]. Окремі публікації присвячені саме гідроагрегатам малої потужності, особливостям їх проектування для конкретних гідрологічних умов та варіантам компоновки обладнання [9, 10]. Ці роботи створюють базу для вибору реалістичних номінальних параметрів гідротурбіни, які використовуються в математичному моделюванні.

Питання побудови динамічних моделей гідротурбіни та систем автоматичного регулювання частоти обертання (САРЧ) для аналізу перехідних процесів у електроенергетичних системах висвітлено у сучасних міжнародних публікаціях [12, 13]. У них запропоновано типові передатні функції гідротурбіни й системи регулювання обертів, розглянуто вплив гідравлічних запізнень, сервоприводів, еластичності водопроводів та нелінійностей виконавчих механізмів. Ці моделі слугують основою для досліджень стабільності та якості регулювання частоти, зокрема в умовах змінного навантаження та роботи в ізольованих або слабких мережах.

Окремий напрям становлять роботи, присвячені порівнянню різних структур і алгоритмів роботи систем керування для малих ГЕС, у тому числі з використанням ПІД-регуляторів, адаптивних та оптимізаційних методів налаштування [14]. У таких дослідженнях аналізується вплив параметрів регуляторів на перехідні процеси потужності та частоти, а показники якості оцінюються з використанням інтегральних критеріїв (ISE, IAE, ITAE) і показників енергоефективності. У більш нових роботах робиться акцент на змінношвидкісному керуванні, максимізації ККД гідроагрегату в широкому діапазоні напорів та навантажень, а також на використанні сучасних обчислювальних методів оптимізації [15].

Разом з тим, попри значний прогрес у моделюванні гідротурбін та розробленні сучасних систем, у більшості публікацій дослідження або зосереджені переважно на енергетичних показниках (ККД, виробіток, втрати), або на динамічних характеристиках (час установлення, перерегулювання, стійкість), тоді як комплексна інтегральна оцінка, що одночасно враховує і якість перехідних процесів, і енергетичні наслідки неідеального регулювання, розглядається недостатньо повно. Це стосується особливо малих ГЕС, які працюють у специфічних умовах децентралізованих мереж і для яких кожен відсоток втрат енергії та погіршення якості електропостачання має суттєве значення. Таким чином, окреслюється наукова ніша, пов'язана з розробленням комплексних показників якості та застосуванням їх для оптимізації параметрів ПІД-регуляторів у системах керування гідротурбінами малих ГЕС на основі динамічного моделювання.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи – підвищити комплексні показники якості роботи малих ГЕС шляхом оптимізації параметрів ПІД-регулятора гідротурбіни на основі динамічного моделювання.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

- обрати реальний прототип гідротурбіни малої ГЕС та узагальнити її основні параметри й статичні характеристики;
- розробити спрощену динамічну модель «гідротурбіна – САРЧ» у вигляді передатної функції другого порядку з ПІД-регулятором;
- записати аналітичні вирази показників якості (ISE, IAE, ITAE) та комплексного показника якості;
- виконати імітаційні дослідження для двох наборів параметрів ПІД-регулятора (неоптимальний та оптимальний), побудувати перехідні та енергетичні характеристики;
- оцінити вплив оптимізації системи керування на комплексний показник якості гідроагрегату мГЕС.

Виклад основного матеріалу

1. Об'єкт дослідження та статичні характеристики гідротурбіни

Як прототип прийнято гідротурбіну Френсіса малої ГЕС з нетто-напором $H_{ном}$=74 м, розрахунковою витратою $Q_{ном}$=2,05 м^3/с та ККД в номінальному режимі $\eta_{ном}$≈0,86. За цими даними номінальна механічна потужність турбіни становить [1]:

$$P_{ном} = \rho g Q_{ном} H_{ном} \eta_{ном} = 1,28 \text{ МВт}, \quad (1)$$

де ρ=1000 кг/м^3 – густина води, g=9,81 м/с^2.

У діапазоні витрат Q у відносних координатах $q=Q/Q_{ном}$, статичні характеристики турбіни апроксимовано аналітичними залежностями:

- напірна характеристика:

$$H(q) = H_{ном}\left[1 - a_h\left(q-1\right)^2\right]; \quad (2)$$

- енергетична характеристика (ККД):

$$\eta(q) = \eta_{max}\exp\left[-b_\eta\left(q-1\right)^2\right]; \quad (3)$$

- потужнісна характеристика:

$$P(q) = \rho g Q H(q)\eta(q). \quad (4)$$

За результатами розрахунку побудовано основні характеристики гідротурбіни, які показані на рис. 1-3).

Максимальна потужність досягається в околиці робочої точки з витратою $Q_{ном}$, а ККД різко зменшується при роботі в надлишковому чи недостатньому напорі.

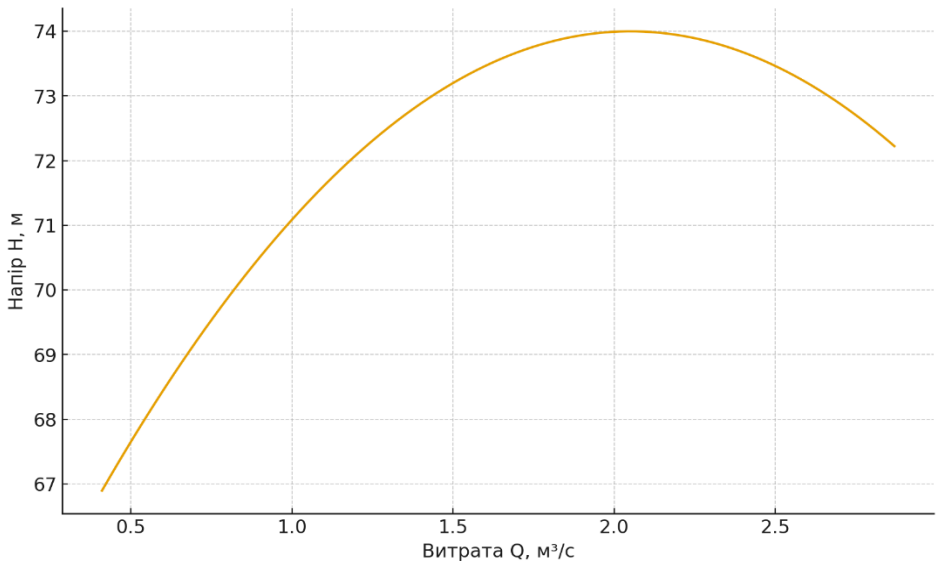

Рис. 1 – Напірна характеристика гідротурбіни
Fig. 2 – Pressure characteristic of a hydroturbine

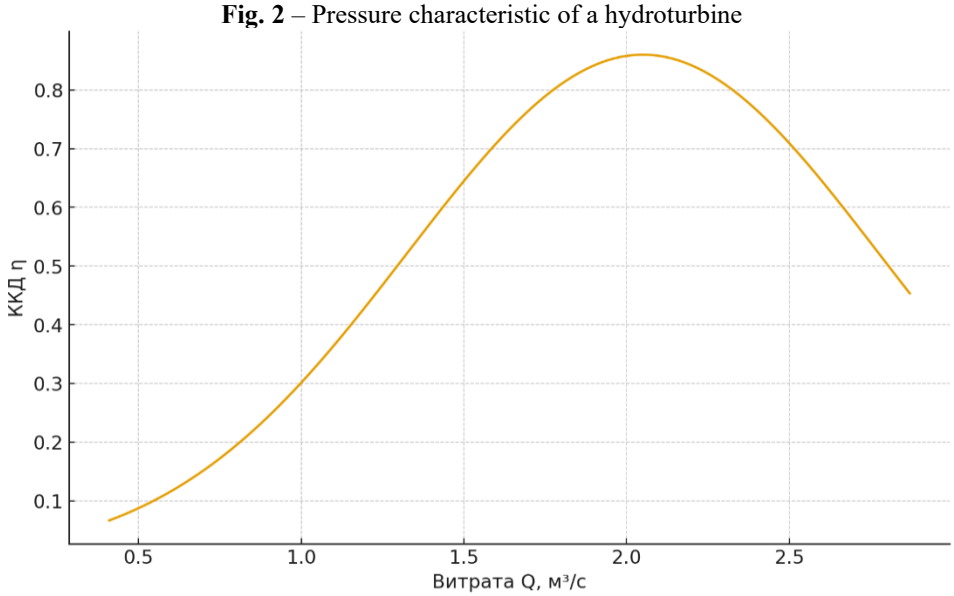

Рис. 2 – Енергетична характеристика гідротурбіни
Fig. 2 – Energy characteristics of a hydroturbine

2. Динамічна модель гідротурбіни та ПІД-регулятора

Для аналізу якості перехідних процесів використано узагальнену модель ланцюга «гідротурбіна – виконавчий механізм» як об'єкта другого порядку [2,12,13]:

$$G(s)=\frac{Y(s)}{U(s)}=\frac{K}{(T_1 s+1)(T_2 s+1)}; \qquad (5)$$

де $Y(s)$ – нормована зміна активної потужності турбіни; $U(s)$ – нормований керуючий сигнал (відкриття напрямного апарата); K – статичний коефіцієнт передачі, T_1, T_2 – постійні часу гідротурбіни та сервопривода.

У моделюванні прийнято: K=1, T_1=2 с, T_2=10 с. У часовій області модель можна записати як:

$$T_1 T_2 \ddot{y}(t)+(T_1+T_2)\dot{y}(t)+y(t)=K\cdot u(t), \qquad (6)$$

де $y(t)$ – нормована потужність, $u(t)$ – керуючий сигнал.

Система керування реалізує ПІД-закон:

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^T e(t)dt+K_d\frac{de(t)}{dt}, \qquad (7)$$

де $e(t)=r-y(t)$ – відхилення від завдання r (нормоване значення потужності).

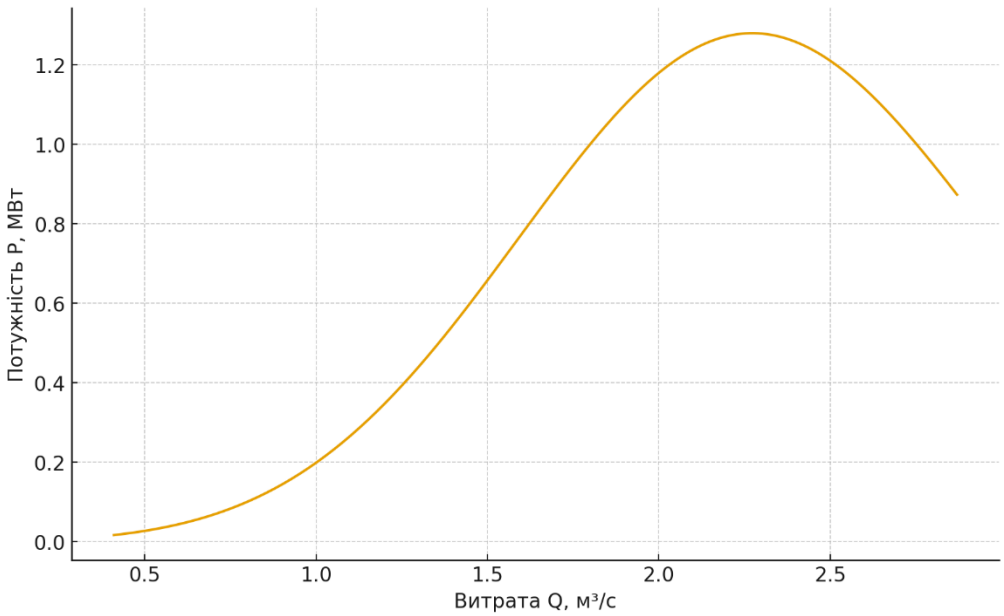

Рис. 3 – Потужнісна характеристика гідротурбіни
Fig. 3 – Characteristics of the transient process at different regulator settings

3. Показники якості та комплексний показник

Для кількісної оцінки застосовано стандартні інтегральні критерії якості:

1. Інтеграл квадрата похибки (ISE):

$$\mathrm{ISE} = \int_0^T e^2(t)dt\,, \qquad (8)$$

2. Інтеграл абсолютної похибки (IAE):

$$\mathrm{IAE} = \int_0^T |e(t)|dt\,, \qquad (9)$$

3. Інтеграл абсолютної похибки, зважений за часом (ITAE):

$$\mathrm{ITAE} = \int_0^T t|e(t)|dt\,, \qquad (10)$$

Енергетичні характеристики оцінювались за інтегралом виробленої енергії:

$$E = \int_0^T P(t)dt = P_{\text{ном}} \int_0^T y(t)dt\,. \qquad (11)$$

Ідеальний перехідний процес відповідає миттєвому досягненню $y(t)$=1. Відносні втрати енергії в перехідному режимі:

$$\Delta E = \frac{E_{\text{ідеал}} - E}{E_{\text{ідеал}}}\,. \qquad (12)$$

Для інтегральної оцінки запропоновано комплексний показник якості:

$$KQ = \sum_{i=1}^{4} w_i p_i\,, \qquad (13)$$

де w_i – вагові коефіцієнти ($\sum w_i$=1); p_1, p_2, p_3, p_4 – нормовані (в інтервалі [0;1]) значення критеріїв ISE, IAE, ITAE та ΔE відповідно. Нормування виконувалося за лінійним правилом:

$$p_i = \frac{I_i^{\max} - I_i}{I_i^{\max} - I_i^{\min}}\,, \qquad (14)$$

де $I_i^{\max}$, $I_i^{\min}$ – найкраще і найгірше значення відповідного критерію серед порівнюваних варіантів. Для попереднього аналізу можна прийняти w_1=w_2=w_3=w_4=0,25.

4. Результати моделювання

Розглянуто одиничний стрибок завдання потужності з 0 до 1 (перехід з холостого ходу на номінальний режим). Порівнювалися два набори параметрів ПІД-регулятора:

- неоптимальний варіант: K_p=4,0; K_i=0,1; K_d=0;
- оптимізований варіант: K_p=3,0; K_i=0,8; K_d=1,5.

Перехідні процеси нормованої потужності наведено на рис. 4.

Неоптимальне налаштування забезпечує відносно мале перерегулювання, але супроводжується тривалим наближенням до сталого значення та значною сталою похибкою. Оптимізоване налаштування дає дещо більший перший максимум, проте значно скорочує час встановлення та забезпечує швидку ліквідацію похибки.

Розраховані значення інтегральних критеріїв (для періоду T=60 с), наведені в таблиці 1.

Хоча значення ISE для оптимізованого регулятора дещо більше (через виразніший перший пік помилки), критерії IAE та, особливо, ITAE істотно поліпшуються (ITAE зменшується приблизно у 2,6 рази), що відповідає більш швидкому затуханню відхилення.

Енергетичні характеристики (накопичена енергія за час перехідного процесу) показані на рис. 5.

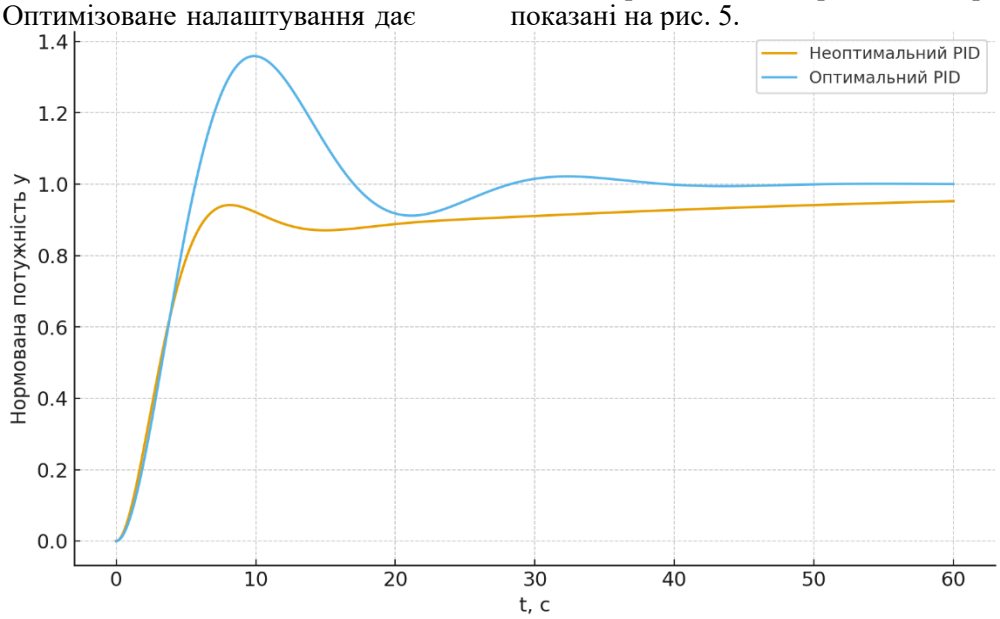

Рис. 4 – Характеристика перехідного процесу за різними налаштуваннями регулятору
Fig. 4 – Characteristics of the transient process at different regulator settings

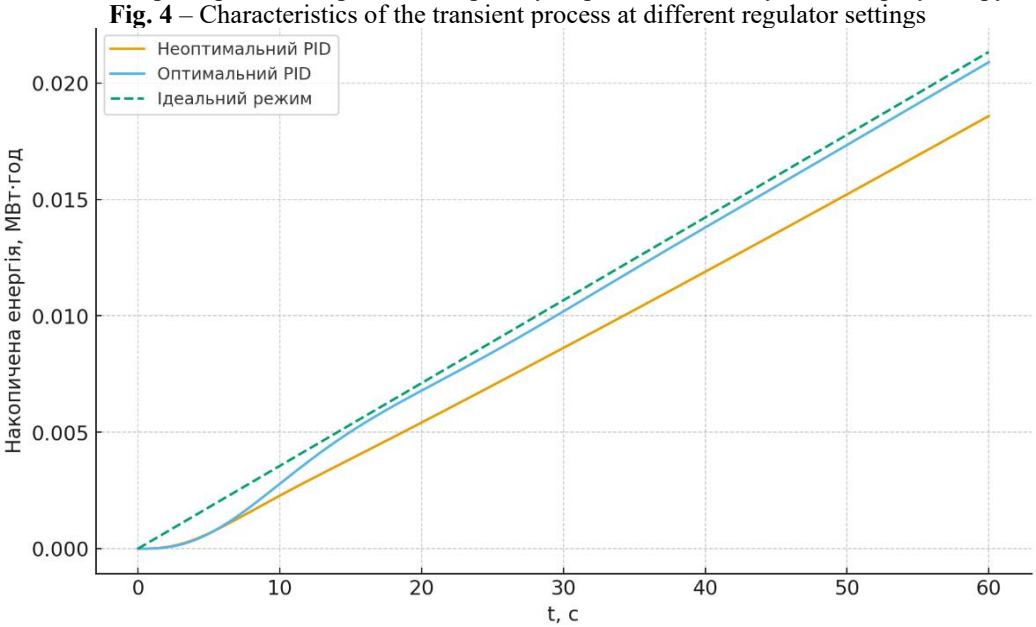

Рис. 5 – Енергетичні характеристики за різними налаштуваннями регулятору
Fig. 5 – Energy characteristics for different regulator settings

Для досліджуваного стрибка навантаження:

- ідеальний режим: $E_{\text{ідеал}} \approx 0{,}0213$ МВт·год;
- неоптимальний ПІД: $E_{\text{non}} \approx 0{,}0186$ МВт·год; $\Delta E_{\text{non}} \approx 12{,}9\%$;
- оптимальний ПІД: $E_{\text{opt}} \approx 0{,}0209$ МВт·год; $\Delta E_{\text{opt}} \approx 2{,}1\%$.

Таким чином, навіть для одного перехідного процесу економія енергії за рахунок оптимізації ПІД-регулятора становить близько 10,8 % від теоретично можливого виробітку в цьому режимі.

За сформованим комплексним показником якості при рівних вагових коефіцієнтах отримаємо:

$$KQ_{\text{non}} = 0{,}25; \qquad KQ_{\text{opt}} = 0{,}75. \tag{15}$$

Це підтверджує суттєву перевагу оптимізованого алгоритму керування з урахуванням сукупності динамічних і енергетичних критеріїв.

Таблиця 1

Інтегральні показники якості за різними настройками регулятору

Table 1

Integral quality indicators for different regulator settings

Критерій/ Criterion	Неоптимальний ПІД/ Suboptimal PID	Оптимальний ПІД/ Optimal PID
ISE	2,7392	3,1545
IAE	7,74	6,50
ITAE	137,50	52,67
E	0,0186 МВт·год	0,0209 МВт·год
Комплексний показник *KQ*/ Comprehensive KQ indicator	0,25	0,75

Обговорення результатів

Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями, які підкреслюють критичну роль САРЧ у забезпеченні стабільної роботи малих ГЕС в ізольованих мережах [13, 14]. Показано, що проста оптимізація параметрів ПІД-регулятора (без зміни структури системи керування) вже дає істотне зменшення інтегральних показників якості та втрат енергії.

Запропонований комплексний показник якості зручний тим, що дозволяє в одному безрозмірному числі врахувати різні аспекти роботи мГЕС – швидкодію, точність, «вартість» помилки з точки зору енергетичних втрат. У подальших роботах до нього доцільно включити додаткові складові, пов’язані з обмеженням швидкостей зміни потужності, ресурсом механічних вузлів, умовами кавітації тощо [1, 5, 9].

Слід зазначити, що використана модель гідротурбіни є спрощеною і не враховує, зокрема, коливань у водопроводі, нелінійної залежності моменту від швидкості та гідродинамічних обмежень. У реальних мГЕС для уточнення параметрів T_1, T_2, K доцільне експериментальне ідентифікування за результатами випробувань, а оптимізація ПІД-регулятора може виконуватись із застосуванням сучасних методів (генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок тощо) [12, 15].

Висновки

1. Показана необхідність підвищення комплексних показників якості роботи малої гідроенергетики та систем керування гідротурбінами. 2. Для реальної гідро турбіни побудовано напірні, енергетичні та потужнісні характеристики. Розроблено спрощену динамічну модель ланцюга «гідротурбіна – САРЧ» у вигляді об'єкта другого порядку з ПІД-регулятором, записано аналітичні вирази критеріїв ISE, IAE, ITAE та комплексного показника якості. 3. Імітаційні дослідження показали, що оптимізація параметрів ПІД-регулятора дозволяє зменшити інтегральний критерій ITAE приблизно у 2,6 рази та знизити відносні втрати енергії в перехідному процесі з 12,9 % до 2,1 %. 4. Запропонований комплексний показник якості підвищується з 0,25 до 0,75 при переході від неоптимального до оптимального алгоритму керування, що кількісно підтверджує ефективність оптимізації. 5. Результати можуть бути використані при модернізації систем керування існуючих малих ГЕС, а також при проектуванні нових об'єктів із підвищеними вимогами до енергоефективності та стабільності режимів.

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. Ciontu M. Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni / M. Ciontu, D. Popescu, M. Motocu // Published in International Conference on… 11 November 2010. – Engineering, Environmental Science. – 2010. DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409
2. Standards / manuals / guidelines for small hydro development. Part 3-1: Selection of turbine and governing system. – New Delhi : Alternate Hydro Energy Centre, 2010. – 62 p. – Access mode : https://www.ieahydro.org/media/4992a422/3-1-Selection-of-turbine-and-governing-system.pdf (Last accessed November 7, 2025)
3. Small-Hydro Manual. – Tokyo : JICA, 2005. – 320 p. – Access mode : https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11810165_04.pdf (Last accessed November 7, 2025)
4. Guide on how to develop a small hydropower plant / Energy Community Secretariat. –Vienna, 2022. – 140 p. – Access mode : https://energycommunityplatform.eu/wp-content/uploads/2022/06/Merged-Guide-Develop-a-Small-Hydropower-Plant.pdf (Last accessed November 7, 2025)
5. Small hydropower technologies – European state-of-the-art handbook. HYPOSO Project. – Stuttgart, 2021. – 180 p. – Access mode : https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/hyposo-handbook-final.pdf (Last accessed November 7, 2025)
6. Мала гідроенергетика України. Т. 2: Технологічні аспекти розвитку / за ред. В. В. Скорохода, Ю. М. Солоніна. – Київ : Ін-т відновлюваної енергетики НАН України, 2013. – 272 с. – Режим доступу : https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf (дата звернення 07.11.2025)
7. Васько П. Ф. Енергетична ефективність гідроагрегатів у складі малої гідроелектростанції за регулювання її потужності по водотоку [Електронний ресурс] / П. Ф. Васько, М. Р. Ібрагімова // Відновлювана енергетика. – 2015. – № 4. – С. 44-49. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2015_4_10 (дата звернення 07.11.2025)
8. Клюха О. О. Сучасний стан та проблеми розвитку малої гідроенергетики України / О. О. Клюха // Вісник НУВГП. Серія «Енергетика». 2013. – Вип. 2(62). – С. 151-156. https://ep3.nuwm.edu.ua/1663/1/Vt6215.pdf (дата звернення 07.11.2025)
9. Зінь М. М. Розрахунок і проектування гідроагрегатів з гідротурбінами малої потужності / М. М. Зінь // Матеріали МНТК «Проблеми гідроенергетики». –

Тернопіль, 2018. – С. 252–253. – Режим доступу : https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/25415/2/MNTK_2018_2018_Zin_M-Calculation_and_designing_of_252-253.pdf (дата звернення 07.11.2025)
10. Бриль А. О. Технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок України з урахуванням природоохоронних обмежень [Електронний ресурс] / А. О. Бриль, П. Ф. Васько, А. В. Мороз // Гідроенергетика України. – 2019. – № 3-4. – С. 47-51. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/gidenu_2019_3-4_13 (дата звернення 07.11.2025)
11. Дранковський В. Є. Гідравлічні електричні станції : навч. посіб. / В. Є. Дранковський, Ю. М. Кухтенков. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – 260 с. – Режим доступу : https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstreams/da5fa85c-6de7-4d6d-b264-b50dca2b9b19/download (дата звернення 07.11.2025)
12. Prasad D. Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of small hydropower plants / Prasad D., Kumar R. // Int. J. Computer Applications. – 2012. – Vol. 1. – P. 1-7. – Access mode : https://scispace.com/pdf/modeling-of-hydraulic-turbine-and-governor-for-dynamic-33hrbe9aj3.pdf (Last accessed November 7, 2025)
13. Okonkwo G. N. Control of a small hydropower system for power supply in a remote community / Okonkwo G. N. // Global Scientific Journal. – 2023. – Vol. 11, no. 5. – P. 165-176. – Access mode : https://www.globalscientificjournal.com/researchpaper/CONTROL_OF_A_SMALL_HYDROPOWER_SYSTEM_FOR_POWER_SUPPLY_IN_A_REMOTE_COMMUNITY.pdf (Last accessed November 7, 2025)
14. Ngoma D. H. Comparative control governor systems for power and frequency optimization in off-grid small hydropower plants / Ngoma D. H. // Energy Systems. – 2025. – Access mode : https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00066-8 (Last accessed November 7, 2025)
15. Zhu Z. Optimal guide vane opening-based variable-speed control for small hydropower units: enhancing efficiency under wide head fluctuations / Zhu Z. // Energy. – 2025. – Vol. 290, Article 130356. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139111 (Last accessed November 7, 2025)

Отримано: 10.09.2025 Прийнято: 07.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[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]**S. PRIDVOROV**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: spridv@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5164-4997
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.

IMPROVING THE PERFORMANCE INDICATORS OF SMALL HYDROPOWER PLANTS THROUGH OPTIMIZATION OF CONTROL SYSTEMS

The article addresses the problem of improving the comprehensive quality indicators of small hydropower plants by optimizing the automatic control systems of hydroelectric generating units. It is shown that, under conditions of increasing penetration of decentralized energy sources and heightened requirements for energy efficiency, the quality of dynamic processes occurring during load changes in small HPPs becomes particularly important. To solve this problem, an approach is proposed for optimizing the parameters of a PID controller within the automatic speed regulation system of a hydroturbine, based on modeling its dynamics as a second-order system with typical hydraulic and electromechanical time constants. A model of a small-capacity Francis turbine with nominal parameters – net head of 74 m, discharge of 2.05 m³/s, and nominal output of approximately 1.28 MW – is used as the research object. Generalized head, efficiency, and power characteristics of the turbine are presented. Simulation studies of the turbine's response to step load changes were carried out

for two configurations of the PID controller: non-optimal and optimized. A quantitative assessment of transient quality was performed using integral error- and time-based criteria, as well as energy efficiency indicators, including the relative loss of generated energy during the transient mode. It is demonstrated that optimal PID tuning significantly reduces the amplitude and duration of oscillations, accelerates the establishment of steady-state conditions, and decreases energy losses from 12.9% to 2.1%. A comprehensive quality index is proposed, integrating dynamic and energy criteria, which can be used as a universal metric for comparing different control strategies. The obtained results confirm the feasibility of optimizing control systems as one of the most effective ways to enhance the performance and reliability of small hydropower plants.

Keywords: quality indicators, hydroturbines, energy saving, control systems, optimization

In cites: Mezerya A., Pridvorov S. (2025), Improving the performance indicators of small hydropower plants through optimization of control systems. *Engineering, (36),* 70-80. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-07 (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. Ciontu, M, Popescu, D. & Motocu, M 2010, 'Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni', *Published in International Conference on… 11 November 2010. Engineering, Environmental Science*. DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409

2. Alternate Hydro Energy Centre, 2010, *Standards / manuals / guidelines for small hydro development. Part 3-1: Selection of turbine and governing system*, viewed <https://www.ieahydro.org/media/4992a422/3-1-Selection-of-turbine-and-governing-system.pdf> (Last accessed November 7, 2025)

3. Small-Hydro Manual, 2005, viewed <https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11810165_04.pdf> (Last accessed November 7, 2025)

4. Energy Community Secretariat 2022, *Guide on how to develop a small hydropower plant*, viewed <https://energycommunityplatform.eu/wp-content/uploads/2022/06/Merged-Guide-Develop-a-Small-Hydropower-Plant.pdf> (Last accessed November 7, 2025)

5. Small hydropower technologies – European state-of-the-art handbook. HYPOSO Project. Stuttgart, 2021, viewed <https://www.hyposo.eu/HYPOSO_Publications/hyposo-handbook-final.pdf> (Last accessed November 7, 2025)

6. Skorohoda, VV & Solonina, YuM (ed) 2013, *Mala gidroenergetika Ukrayini. Tom II. Tehnologichni aspekti rozvitku* [Small Hydropower of Ukraine. Volume II. Technological Aspects of Development], In-t vidnovlyuvanoyi energetiki NAN Ukrayini, Kyiv. (in Ukraine)

7. Vasko, PF & Ibragimova, MR 2015, 'Energetichna efektivnist gidroagregativ u skladi maloyi gidroelektrostanciyi za regulyuvannya yiyi potuzhnosti po vodotoku' [Energy efficiency of hydraulic units in a small hydroelectric power plant for regulating its power along the watercourse.], *Vidnovlyuvana energetika*, no 4, Pp. 44-49. (in Ukraine)

8. Klyuha, OO 2013, 'Suchasnij stan ta problemi rozvitku maloyi gidroenergetiki Ukrayini' [Current status and problems of development of small hydropower in Ukraine], *Visnik NUVGP. Seriya «Energetika»*, iss. 2(62), Pp. 151-156. (in Ukraine)

9. Zin, MM 2018, 'Rozrahunok i proektuvannya gidroagregativ z gidroturbinami maloyi potuzhnosti' [Calculation and design of hydraulic units with low-power hydraulic turbines], *Materiali MNTK «Problemi gidroenergetiki»*, Ternopil, Pp. 252–253. (in Ukraine)

10. Bril, AO, Vasko, PF & Moroz, AV 2019, 'Tehnichnij potencial gidroenergetichnih resursiv malih richok Ukrayini z urahuvannyam prirodoohoronnih obmezhen' [Technical potential of hydropower resources of small rivers of Ukraine taking into account environmental restrictions], *Gidroenergetika Ukrayini*, no 3-4, Pp. 47-51. (in Ukraine)

11. Drankovskij, VYe & Kuhtenkov, YuM 2023, *Gidravlichni elektrichni stanciyi* [Hydraulic power plants], NTU «HPI», Kharkiv. (in Ukraine)

12. Prasad, D & Kumar, R 2012, 'Modeling of hydraulic turbine and governor for dynamic studies of small hydropower plants', *Int. J. Computer Applications,* Vol. 1, P. 1-7.

13. Okonkwo, GN 2023, 'Control of a small hydropower system for power supply in a remote community', *Global Scientific Journal*, Vol. 11, no. 5, P. 165-176.

14. Ngoma, DH 2025, 'Comparative control governor systems for power and frequency optimization in off-grid small hydropower plants', *Energy Systems*, viewed <https://link.springer.com/article/10.1007/s43937-025-00066-8> (Last accessed November 7, 2025)

15. Zhu, Z 2025, 'Optimal guide vane opening-based variable-speed control for small hydropower units: enhancing efficiency under wide head fluctuations', *Energy*, Vol. 290, Article 130356. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139111 (Last accessed November 7, 2025)

Submission received: 09/10/2025 Accepted: 11/07/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-08
УДК 621.311.22

[1]**Г.І. КАНЮК,** доктор технічних наук
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**Д.О. ЧИРОЧКІН**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: chirochkin123@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9029-0471
[1]*Харківський національний університет імені. В.Н. Каразіна,*
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РОБОТИ НАСОСІВ ГЛИБИННИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

В статті проведено аналіз діючої нормативної бази України з питання забезпечення високих показників якості роботи глибинних насосів, які використовуються в нафтовидобувної галузі. Встановлено, що одним з ефективних методів підвищення показників якості глибинних насосів є удосконалення нормативної бази, спрямованої не тільки на визначення необхідних показників, але й на гарантовану підтримку їх в процесі експлуатації на всьому діапазоні можливих режимів роботи. Визначено, що глибинні насоси використовуються більш ніж в половині всього фонду нафтогазовидобувних підприємств. Тому глибинні насоси є одними з найбільш важливих компонентів сучасних систем нафтовидобувної галузі. Технічний стан насосних установок в значній мірі визначає показники якості нафтових підприємств. Нестабільність роботи насосів і, тим більше, їхня відмова може привести до значних збитків та інших негативних наслідків для нафтокомплексу. Доведено, що забезпечення високих показників ефективності і надійності роботи глибинних насосів є однією з найважливіших завдань в напрямку створення стійкого, надійного та високоекономічного функціонування нафтовидобувних комплексів та забезпечення мінімальних можливих втрат енергії на видобування нафти (зниження собівартості видобутку нафти). З аналізу нормативного забезпечення України зроблено висновок, що існуючі нормативні документи достатньо повно регламентують загальні питання, які пов'язані з термінологією та основними положеннями проєктування та експлуатації глибинних насосів та нафтовидобувних комплексів де вони працюють. Є корисні методики щодо створення та експлуатації автоматичних систем керування глибинними насосами та методики щодо проведення відповідних вимірювань, але в нормативній базі не повно відображені методики визначення та підвищення деяких показників якості роботи глибинних насосів, бракує нормативних документів, які регламентують забезпечення високих технічних показників якості глибинних насосів при їх автоматичному керуванні, бракує методик визначення та підтримки енергоефективних режимів роботи глибинних насосів в широкому діапазоні нормальної експлуатації в режимі реального часу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, нормативне забезпечення, глибинні насоси, нафтовидобувні комплекси, енергозбереження.

Як цитувати: Канюк Г. І., Чирочкін Д.О. Аналіз нормативної бази забезпечення високих показників якості роботи насосів глибинних насосних станцій. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 81-91. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-08

© Канюк Г. І., Чирочкін Д.О. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

Нафтогазовидобувні підприємства (НГВП) наряду із насосними станціями глибинного типу є одними з основних елементів господарства цілих країн, або окремих регіонів. Ефективність роботи глибинних насосних станцій визначає не тільки кількість робочих місць, але й наповнюваність бюджету країни. Серед основних устаткувань, які застосовуються у глибинних станціях, значне місце займають насосні агрегати поршневого та відцентрового типу, якість роботи яких впливає на загальні показники якості станцій. В останні роки у зв'язку з різноманітними труднощами, обумовленими головним чином воєнними діями та нестабільністю в питаннях ціноутворення, стали більше уваги приділяти показникам якості роботи глибинних насосних станцій, в тому числі в нафтовидобувної галузі. Для цього регулярно проводитися енергоаудіт об'єктів нафтогазовидобувних підприємств, розробляються заходи щодо підвищення енергоефективності та інших показників якості. Як правило, такі заходь не дозволяють отримати істотної економії в споживанні енергоресурсів, тому що розглядають відособлені процеси або об'єкти, і майже не розглядають весь технологічний процес в цілому. Так, наприклад, визначено, що дотепер перераховані вище агрегати в більшості випадків оснащуються нерегульованим електроприводом, виконаним на базі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що значно обмежує діапазон можливої оптимізації виробничого процесу та істотно погіршує показники якості нафтовидобувного комплексу. В Україні, з огляду на енергоємність багатьох промислових і аграрних систем, підвищення ефективності насосів може мати значний фінансовий ефект.

У випадку водозабору, зрошення сільського господарства, підняття підземних вод чи інших застосувань – якість насосів впливає на надійність постачання. В умовах, коли капітальні ресурси можуть бути обмеженими, інвестиція в обладнання з високими показниками якості окупається через зменшені витрати в довгостроковій перспективі.

Одним з ефективних методів підвищення показників якості глибинних насосів є удосконалення нормативної бази, спрямованої не тільки на визначення необхідних показників якості, але й на гарантовану підтримку їх в процесі експлуатації на всьому діапазоні можливих режимів роботи обладнання глибинних насосних станцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню підвищення показників якості роботи глибинних насосів та іншого обладнання нафтовидобувних та господдарських підприємств у вітчизняній та закордонній науковій літературі приділяється велика увага. Це пов’язано, насамперед, із зростанням попиту на енергоносії та загальним світовим трендом на енергозбереження. Енергозбереження на виробництві є окремим питанням Енергетичної стратегії України на період до 2030 року [1], де встановлені вимоги та рекомендації щодо шляхів енергозбереження, орієнтовних термінів запровадження, джерел фінансування і таке інше.

В цьому напрямку оптимізуються показники якості технологічних процесів об’єктів керування [2] та оптимізація складу технологічних об’єктів і систем в енергетиці [3]. Удосконалюється метрологічне забезпечення енергоефективних режимів роботи глибинних насосів [4] та нормативна база щодо забезпечення енергоефективних режимів їх роботи [5]. Ефективно вирішуються питання технікного переобладнання з метою покращення показників якості. Так у дослідженні [6] запропоновано використання високоефективних насосів (наприклад із синхронним магнітним двигуном). Це дозволило підвищити загальний ККД глибинних станцій до 70 % і отримати до 20 % економії електроенергії. Розглядаються можливості та перспективи частотного керування глибинними насосами. В роботі [7] проведено розрахунок економічної

ефективності впровадження частотних перетворювачів для насосних агрегатів різних типів, а в роботі [8] наведені шляхи підвищення якості систем керування насосними агрегатами шляхом використання частотно-керованого електроприводу.

Удосконалюються та оптимізуються регулятори. Використовуються комбінаторні методи з метою оптимізації регуляторів [9], удосконалюються методи математичного моделювання регуляторів [10], оптимізуються системи керування на основі ПІД-регуляторів [11]. Ефективно вирішуються питання підвищення точність при випробуваннях та отриманні енергетичних характеристик глибинних насосів [12], що вкрай важливо для точного розрахунку параметрів, які визначать показники якості. Для насосів нафтогалузі адаптуються характеристики водних насосів на насоси, які перекачують в'язкі рідини [13]. Проводяться дослідження щодо підвищення показників якості глибинних насосів шляхом удосконалення систем керування [14] та засобів регулювання параметрів насосних агрегатів, які дозволяють забезпечити високі показники якості роботи глибинних насосів. Але не зважаючи на велику кількість корисних наукових робіт вітчизняних та закордонних вчених, питання підвищення показників якості глибинних насосів розкрите не повністю. Бракує методик визначення в реальному часі оптимальних параметрів глибинних насосів, які б гарантовано забезпечували необхідний технологічних процес та високі показники якості роботи, насамперед, технічні показники якості – коефіцієнти корисної дії. Бракує методик синтезу енергоефективних регуляторів, які працюють за критерієм мінімуму втрат в глибинному насосі. Бракує нормативних документів, спрямованих на синтез та експлуатацію таких систем керування, що не дозволяє використовувати сучасні наробки (математичні моделі, алгоритми керування, нові типи регуляторів тощо) в діючих системах автоматичного керування глибинними насосами нафтовидобувних та загальногосподарських підприємств.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз нормативних документів України щодо визначення та підтримки високих показників якості роботи глибинних насосів нафтогазовидобувних та загальногосподарських підприємств.

Виклад основного матеріалу

Ще 3-5 років тому питання підвищення показників якості глибинних насосів та нафтовидобувних комплексів було не дуже актуально, тому що ціна товарної нафти знаходилась на досить високому рівні, а вартість електроенергії була відносно невисока. Будь-яке зниження дебіту приводило до збитків, які не могли бути компенсовані зекономленою електроенергією. Але в теперішній час та особливо при подальшій зміні співвідношень цін нафти і електроенергії, питання підвищення якості стає усе більше актуальним.

Глибинні насоси використовуються більш ніж в половині всього фонду нафтогазовидобувних підприємств. Понад 95-98% електроенергії на нафтогазодобувних підприємствах та глибинних насосних станціях загальногосподарського призначення, споживається приводами різних насосів: скважних, водяних, нафтових і інших. Тому глибинні насоси є одними з найбільш важливих компонентів сучасних систем нафтовидобувної галузі. Технічний стан насосних установок в значній мірі визначає показники якості нафтових підприємств: ступінь готовності, працездатність, продуктивність і надійність, особиво, в умовах інтенсивної експлуатації і пов'язаного із цим спрацювання устаткування. Нестабільність роботи насосів і, тим більше, їхня відмова може привести до значних збитків та інших негативних наслідків для нафтокомплексу. Забезпечення високих показників ефективності і надійності роботи глибинних насосів є однією з найважливіших завдань в напрямку створення стійкого, надійного та високоекономічного функціонування нафтокомплексів та забезпечення мінімальних можливих втрат енергії на видобування нафти.

Практичний ефект підвищення показників якості роботи електроприводів нафтовидобувного устаткування полягає не тільки в підвищенні технічних показників (показники енергетичної ефективності, показники якості систем автоматичного керування, показники експлуатаційної ефективності), але й в забезпеченні більше дбайливого режиму експлуатації устаткування: знижуванні зношування (підвищення показників надійності та довговічності), збільшення строку експлуатації і міжремонтного періоду, зменшення витрат на ремонт, а також витрат, пов'язаних із простоєм нафтогазовидобувних шпар. Всі технологічні процеси на НГВП тісно взаємозалежні і їх показники якості повинні оцінюватися комплексно. Відособлена оптимізація одних процесів може привести до збільшення втрат в інших процесах. Таким чином, потрібна комплексна нормативна база забезпечення показників якості елементів НГВП, спрямована на зниження собівартості видобутку нафта та підвищення конкурентоспроможності вітчизняних нафтогазовидобувних підприємств.

Існуюча нормативна база повинна регламентувати методи та методики забезпечення високих показників якості нафтовидобувного обладнання, зокрема, глибинних насосів. Шлях Євроінтеграції України вимагає відповідності нормативної бази України міжнародним стандартам, що гарантує забезпечення високих показників якості нафтовидобувних підприємств та їх окремих елементів. З метою визначення такої відповідності проведено аналіз існуючої нормативної бази України щодо підвищення показників якості елементів нафтовидобувних підприємств, короткий зміст якого наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз нормативної бази України щодо підвищення показників якості нафтовидобувних підприємств та їх елементів

Table 1

Analysis of the regulatory framework of Ukraine regarding the improvement of quality indicators of oil-producing enterprises and their elements

	Стандарт	Короткий аналіз змісту
	ДСТУ 2226-93	Документ визначає термінологію та основні визначення щодо автоматизованих систем, які можуть використовуватись в НГДП
	ДСТУ 2709-94	Документ визначає основні положення метрологічного забезпечення, яке використовується в автоматизованих системах керування, в тому числі в НГДП
	ДСТУ 3626-97	Документ визначає положення базових програмно-технічних комплексів локального рівня для розосереджених систем керування. Призначено для автоматизації окремих машин, агрегатів, технологічних процесів і установок, а також в інтегрованих системах керування підприємств нафтовидобувної промисловості
	ДСТУ 4134-2002	В документі визначені методики проведення вимірювань в інформаційних системах автоматизованих систем керування. Наведені методики визначення похибок вимірювань та їх коректування в процесе експлуатації обладнання промислових підприємств
	ДСТУ EN 61069-5:2022 (EN 61069-5:2016, IDT; IEC 61069-5:2016, IDT)	Документ регламентує питання вимірювання, керування та автоматизації технологічних процесів промислових об’єктів Наведені методики оцінювання показників якості, а саме показників надійності
	ДСТУ EN 809:2015 (EN 809:1998+A1:2009, AC:2010, IDT)	Документ визначає технічні вимоги щодо техніки безпеки при конструюванні, збиранні, монтуванні, експлуатації та обслуговуванні насосних установок. Визначено перелік небезпек, які можуть виникати при невірному використанні насосних установок. Визначені заходи, яки направлені на зниження таких небезпек

	ДСТУ EN 12162:2013 (EN 12162:2001+A1:2009, IDT)	Документ визначає методику проведення гідравлічних випробувань з метою перевірки складових частин всіх типів рідинних насосів під тиском
	ДСТУ ГОСТ 6134:2009 (ICO 9906:1999)	Документ визначає вимоги щодо програми проведення та методики випробувань динамічних насосних установок в тому числі на місці експлуатації за гідравлічними характеристиками. Визначені гарантійні зобов'язання та їх підтвердження при приймальних випробуваннях
	ДСТУ 3063-95	Документ визначає терміни щодо насосів, які призначені для перекачування з низького рівня на високий. Документ визначає класифікацію таких насосів та принципи їх проектування та експлуатації з урахуванням в'язкості нафти
0	ДСТУ 3455.2-96 Частина 2. (ISO 5598:1985, NEQ).	Документ визначає терміни щодо об'ємних гідроприводів та пневмоприводів при проектуванні та експлуатації
1	ДСТУ EN ISO 15551-1:2022 Частина 1. (EN ISO 15551-1:2015, IDT; ISO 15551-1:2015, IDT)	Документ відноситься до нафтової та газової промисловості, а саме до бурового та виробничого обладнання. Документ регламентує проектування систем електричних глибинних насосів
2	ДСТУ EN ISO 13710:2022 (EN ISO 13710:2004, IDT; ISO 13710:2004, IDT)	Документ регламентує питання проектування та техніки безпеки при експлуатації поршневих об'ємних насосів нафтової, нафтохімічної та газової промисловості
3	ДСТУ 4110-2002 (ANSI/IEEE 739:95, NEQ)	Документ регламентує практичні питання енергозбереження та економічно ефективного планування режимів роботи обладнання на промислових підприємствах. Визначено принципи складання енергобалансу підприємства та обладнання. Зазначено необхідність аналізу енергоспоживання. Регламентовано методика аналізу та розрахунку витрат енергоресурсів на виробництві. Встановлені типові форми для впорядкування інформації щодо енергозбереження
4	ДСТУ 3682-98 (ГОСТ 30583-98)	Документ регламентує методику визначення повної енергоємності виробництва (продукції, послуг, режимів). Стандарт є обов'язковим до використання
5	ДСТУ 3886-99	Документ регламентує вимоги до розрахунку потужності, коефіцієнту потужності електроприводів глибинних насосів. Встановлено вимоги до вибору типу електроприводу. Наведено рекомендації щодо вибору методів вирівнювання навантаження та вимоги до проведення енергоаудиту глибинних насосів. Наведені вимоги щодо складу та оформленню документації та надані рекомендації з енергозбереження в електроприводах в тому числі глибинних насосів
6	ДСТУ 5003.3-1:2008	Документ упорядковує всі процеси створення, функціювання та подальшого розвитку автоматизованих систем обліку електричної енергії. Є базою для визначення рівня енергозбереження та показників якості, в яких враховується споживча енергія
7	ДСТУ 4715:2007	Документ встановлює склад і зміст робіт на стадіях проектування та впровадження систем енергетичного аудиту на нафтовидобувному підприємстві. Документ встановлює вимоги щодо послідовності робіт та запровадження системи енергетичного аудиту, складання проектної та експлуатаційної документації

8	ДСТУ 4713:2007	Документ визначає призначення і завдання енергетичного аудиту, основні етапи енергетичного аудиту, вимоги до робіт, вимоги до збирання та аналізування інформації, вимоги до розробки рекомендацій щодо впровадження енергозбереження та техніко-економічне обґрунтування енергозберігаючих заходів
9	ДСТУ 5077:2008	Документ встановлює загальні вимоги до порядку перевірки ефективності функціювання системи енергетичного менеджменту, контролювання ефективності, визначення критеріїв перевірки ефективності та порядку визначання рівня ефективності функціювання систем енергетичного менеджменту
0	СОУ-Н МПЕ 40.1.09.151:2005	Документ визначає вимоги щодо складання енергетичних характеристик устаткування. Регламентовано порядок визначення нормативних питомих витрат. Наведено методичні рекомендації щодо заощадження палива на підприємствах
1	ДСТУ EN 62308:2022 (EN 62308:2006; IEC 62308:2006, IDT)	Документ регламентує питання надійності обладнання. Наведені методи оцінювання показників надійності
2	ДСТУ 2861-94	Документ встановлює основні положення та порядок проведення аналізу показників надійності об'єктів зокрема нафтовидобувної галузі. Документ діє на технічні системи, пристрої, машини, механізми, апаратуру, прилади чи будь-які їх частини
3	ДСТУ 2862-94	Документ встановлює загальні вимоги і положення щодо розрахунку таких показників якості, як показники безвідмовності, показники довговічності, показники ремонтопридатності, показники збережуваності та комплексних показників надійності
4	ДСТУ 2863-94	Документ встановлює загальні вимоги до забезпечення показників надійності, а також порядок їх визначення. Документ є основою для розробки державних та галузевих стандартів в напрямку забезпечення високих показників надійності
5	ДСТУ 2864-94	Документ встановлює основні положення щодо оцінювання і контролю показників надійності техніки. Визначені види експериментальних досліджень показників надійності
6	ДСТУ 3004-95	Документ встановлює методи вибору експериментальних випробувань з метою визначення та оцінки показників надійності технічних систем, пристроїв, машин та механізмів, які розглядаються з погляду надійності як самостійні одиниці

Нормативні документи достатньо повно регламентують загальні питання, які пов’язані з термінологією та основними положеннями проєктування та експлуатації глибинних насосів та нафтовидобувних комплексів де вони працюють. Є корисні методики щодо створення та експлуатації автоматичних систем керування глибинними насосами та методики щодо проведення відповідних вимірювань (гідравлікних, динамічних тощо), необхідних як для задач ефективного керування, так й для визначення основних техніко-економічних показників роботи насосів.

В нормативній базі не повно відображені методики визначення та підвищення деяких показників якості роботи глибинних насосів. Так, наприклад, велика увага приділяється показникам надійності, що є вкрай важливим, але технічним показникам якості, таким як коефіцієнт корисної дії, такої уваги бракує, що може призвести до підвищення собівартості та зниженню показників енергоефективності нафтовидобувної галузі. Тобто, бракує нормативних документів, які регламентують забезпечення високих технічних показників якості глибинних насосів при їх автоматичному керуванні. Нормативні документ, які розглядають питання енергоефективності, регламентують практичні питання енергозбереження та економічно ефектив-

ного планування режимів роботи, принципи складання енергобалансу та аналізу енергоспоживання. Є методики аналізу та розрахунку витрат енергоресурсів. Але майже все це є аналіз та планування, тобто визначення показників якості, а не їх підтримка в режимі експлуатації. Бракує методик визначення та підтримки енергоефективних режимів роботи глибинних насосів в широкому діапазоні нормальної експлуатації в режимі реального часу.

Підтвердження цього висновку можна побачити на рис.1, де наведена класифікація існуючих нормативних документів за ознакою напряму, яке розглядається в стандарті. З класифікації видно, що питанню покращення технічних показників якості глибинних насосів, а саме показникам енергоефективності, приділяється недостатньо уваги, що є головних недоліком існуючої нормативної бази України.

Рис. 1 – Структура нормативної бази щодо забезпечення високих показників якості глибинних насосів та елементів насосних станцій

Fig. 1 – Structure of the regulatory framework for ensuring high quality indicators of deep well pumps and pumping station elements

Висновки

Глибинні насоси є основними елементами, режими роботи яких визначають техніко-економічні показники нафтовидобувного підприємства та загальнопромислових насосних станцій свердловинного типу. Технічні показники якості роботи глибинних насосів значно впливають на загальні галузеві показники якості. Майже 95% витрат на власні потреби нафтовидобувного підприємства йде на привід насосів, серед яких глибинні є найпотужнішими. Режими роботи глибинних насосів в значній мірі визначають собівартість видобування нафти та впливають на показники енерго-ефективності всієї нафтовидобувної галузі, тому саме удосконаленню нормативної бази та підвищенню показників якості глибинних насосів треба приділяти увагу при вирішенні задачі підвищення показників якості нафтовидобувних комплексів.

Проведено аналіз існуючих нормативних документів Украйни, які регламентують визначення та забезпечення високих показників якості глибинних насосів нафтовидобувних комплексів та розроблена класифікацію нормативних документів за відповідними напрямками. Аналіз показав, що в існуючій нормативній базі бракує нормативних методик визначення та підтримки енергоефективних режимів роботи глибинних насосів в широкому діапазоні нормальної експлуатації в режимі реального часу, в тому числі методик синтезу енерго-ефективних систем керування, які працюють за критерієм мінімуму сумарних втрат енергії в глибинній насосній станції.

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. Енергетична стратегія України на період до 2030 року// Інформаційно-аналітичний вісник «Відомості Міністерства палива та енергетики України». Спеціальний випуск. –2006. – 113 с. Доступ: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text

2. Канюк Г.І. Оптимізація показників якості технологічних процесів об’єктів керування в енергетиці / Г.І. Канюк, А.Ю. Мезеря, Т.Ю. Василець, С.М. Келеберда, А.С. Пономаренко, Д.О. Чирочкін // Машинобудування. – Харків. 2023, №32. –С.55-63. DOI https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-55-63

3. Дубовской С.В. Дослідження та оптимізація технологічних об’єктів і систем енергетики / С.В. Дубовський, М.Е. Бабин, Н.Я. Каденський // Проблеми загальної енергетики. –2013. –Вип. 3(34). –С.35-46 Доступ: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiUnurTn-qPAxWeIBAIHeCMEQYQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fsystemre.org%2Findex.php%2Fjournal%2Farticle%2Fdownload%2F68%2F55%2F&usg=AOvVaw0Pe5wta3iqp4XAKUZAbDfC&opi=89978449

4. Чирочкін Д.О. Аналіз метрологічного забезпечення енергоефективних режимів роботи глибинних насосів / LVII Студентська науково-практична конференція. Харків, УІПА, 2022 – С.15.

5. Канюк Г.І. Удосконалення нормативної бази забезпечення енергоефективних режимів роботи насосних установок електричних та нафтоперекачувальних станцій / Г.І. Канюк, В.М. Князєва, А.Ю. Мезеря, А.М. Чеботарьов. –Харків: Друкарня Мадрид, 2020. –126 с. :48 іл., 22 табл. ISBN 978-617-7875-55-2

6. Beck M. Increasing Energy Efficiency in Water CollectionSystems by Submersible PMSM Well Pumps / M.Beck, A.Sperlich, R.Blank, E.Meyer, R.Binz, M.Ernst // Water. 2018. 10(10):1310. DOI:10.3390/w10101310

7. Волошин М.М. Розрахунок економічної ефективності впровадження частотних перетворювачів для насосних агрегатів: методичні рекомендації. Херсон : РВВ ХДАУ «Колос», 2012. –40 с. Доступ: https://www.researchgate.net/publication/357379019_ENERGOEFEKTIVNA_VODOPODACA_NA SOSNIH_STANCIJ_KAHOVSKOI_ZROSUVALNOI_SISTEMI

8. Крамаренко Ю.О. Підвищення якості систем керування насосними агрегатами шляхом використання частотно-керованого електроприводу / Ю.О. Крамаренко, В.А. Дрозд // Збірник наукових праць «Машинобудування» – Харків, УІПА. –№33, 2024 –С.61-69. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-38-50

9. Zhang W.G. Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve / W.G. Zhang, W.D. Yang, F.X. Dou, L.J. Wang // Petrochemical Equipment. – 2016. – Vol. 45. – № 6. – P. 73-76. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016

10. Ke L. Modeling and Simulation of Variable Frequency Pump Control Fatigue Test Machine / L. Ke, Y.C. Liu // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2016. – Vol. 29. – № 1. – P. 92–102. DOI: https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.13

11. Li Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / Y. Li, K.H. Ang, G.C.Y. Chong // IEEE Control Systems Magazine, 2006. –P.41-54. Доступ: https://www.researchgate.net/publication/3207696_Patents_software_and_hardware_for_PID_control_An_overview_and_analysis_of_the_current_art

12. Derakhshan S. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation / S. Derakhshan, A. Nourbakhsh // Experimental Thermal and Fluid Science. 2008, Vol. 32, –№. 8, –P. 1620-1627. Доступ: https://www.researchgate.net/publication/223273716_Theoretical_numerical_and_experimental_investigation_of_centrifugal_pumps_in_reverse_operation

13. Андреєв О.В. Перерахунок характеристик відцентрових насосів на в'язкі рідини / О.В. Андреєв, Л.І. Загребельна, О.В. Кобець // Інтегровані технології та енергозбереження. № 1 – 2021. –С. 21-31. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.1.03

14. Крамаренко Ю.О. Підвищення якості насосних установок шляхом удосконалення систем керування / Ю.О. Крамаренко, В.А. Дрозд // Збірник наукових праць «Машинобудування» – Харків, УІПА. –№32, 2023. –С.29-36. DOI https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-29-36

15. Канюк Г.І. Аналіз засобів регулювання параметрів насосних агрегатів магістральних нафтопроводів України / Г.І. Канюк, О.В. Андреєв, А.М. Чернюк, В.М. Князєва // Вісник НТУ "ХПІ": Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. –№10(1182). –2016. –С.85-91. https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.10.13

Отримано: 06.10.2025 Прийнято: 12.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]**G. KANJUK,** D.Sc.,
Head of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**D. CHIROCHKIN**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: chirochkin123@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9029-0471
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.

ANALYSIS OF THE REGULATORY BASE FOR ENSURING HIGH PERFORMANCE QUALITY INDICATORS OF PUMPS OF DEEP PUMPING STATIONS

The article analyzes the current regulatory framework of Ukraine on the issue of ensuring high performance quality indicators of submersible pumps used in the oil production industry. It has been established that one of the effective methods of improving the quality indicators of submersible pumps is the improvement of the regulatory framework aimed not only at determining the necessary indicators, but also at their guaranteed support during operation in the entire range of possible operating modes. It was determined that submersible pumps are used in more than half of the entire fund of oil and gas production enterprises. Therefore, submersible pumps are one of the most important components of modern systems in the oil production industry. It has been established that the technical condition of pumping installations largely determines the quality indicators of oil enterprises, the instability of pumps and, moreover, their failure can lead to significant losses and other negative consequences. It has been proven that ensuring high efficiency and reliability of deep pumps is one of the most important tasks in the direction of creating stable, reliable and highly economical functioning of oil production complexes and ensuring the minimum possible energy losses for oil production (reducing the cost of oil production). From the analysis of the regulatory support of Ukraine, it was concluded that the existing regulatory documents sufficiently fully regulate the general issues related to the terminology and basic provisions of the design and operation of deep pumps and oil production complexes where they work. There are useful methods for the creation and operation of automatic control systems for submersible pumps and methods for conducting relevant measurements, but the regulatory base does not fully reflect the methods for determining and improving some indicators of the quality of operation of submersible pumps, there is a lack of regulatory documents that regulate the provision of high technical quality indicators of submersible pumps during their automatic control, there is a lack of methods for determining and maintaining energy-efficient modes of operation of submersible pumps in a wide range of normal operation in real time.

***Keywords*:** quality indicators, regulatory support, deep pumps, oil production complexes, energy saving.

In cites: Kanjuk G., Chirochkin D. (2025), Analysis of the regulatory base for ensuring high performance quality indicators of pumps of deep pumping stations. *Engineering, (36),* 81-91. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-08 (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. Ministerstvo paliva ta energetiki Ukrayini 2006, *Energetichna strategiya Ukrayini na period do 2030 roku* [Ministry of Fuel and Energy of Ukraine 2006, Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030], viewed <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> (Last accessed October 6, 2025)

2. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu, Vasilec, TYu, Keleberda, SM, Ponomarenko, AS & Chirochkin, DO 2023, 'Optimization of quality indicators of technological processes and objectives of energy management', *Engineering*, Iss. 32, Pp.55-63. DOI https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-55-63 (Last accessed October 6, 2025)

3. Dubovskoj, SV, Babin, ME & Kadenskij, NYa 2013, 'Doslidzhennya ta optimizaciya tehnologichnih ob'yektiv i sistem energetiki' [Research and optimization of technological objectives and energy systems], *The Problems of general energy*, Pp.35-46 (in Ukraine)

4. Chirochkin, DO 2022, 'Analiz metrologichnogo zabezpechennya energoefektivnih rezhimiv roboti glibinnih nasosiv' [Analysis of metrological support for energy-efficient operating modes of deep well pumps], *LVII Studentska naukovo-praktichna konferenciya*, Pp. 15. (in Ukraine)

5. Kanyuk, GI, Knyazyeva, VM, Mezerya, AYu & Chebotarov, AM 2020, 'Udoskonalennya normativnoyi bazi zabezpechennya energoefektivnih rezhimiv roboti nasosnih ustanovok elektrichnih ta naftoperekachuvalnih stancij' [Improvement of the regulatory base for ensuring energy-efficient operating modes of pumping stations of electric and oil-transfer stations], Drukarnya Madrid, Kharkiv (in Ukraine)

6. Voloshin, MM 2012, 'Calculation of the economic effectiveness of the implementation of frequency converters for pump units', RVV HDAU «Kolos», Kherson (in Ukraine)

7. Kramarenko, you & Drozd, VA 2024, 'Improving the quality of the pump unit control system by using frequency-controlled electric drive', *Engineering*, Iss. 33, Pp. 61-69. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-38-50

8. Zhang, WG, Yang, WD, Dou, FX & Wang, LJ 2016, 'Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve', *Petrochemical Equipment*, Vol. 45, no 6, Pp. 73-76. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016 (Last accessed October 6, 2025)

9. Ke, L & Liu, YC 2016, 'Modeling and Simulation of Variable Frequency Pump Control Fatigue Test Machine', *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, Vol. 29, no 1, Pp. 92–102. DOI: https://doi.org/10.5829/idosi.ije.2016.29.01a.13 (Last accessed October 6, 2025)

10. Li, Y, Ang, KH & Chong, GCY 2006, 'Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art', *IEEE Control Systems Magazine*, Pp. 41-54, viewed < https://www.researchgate.net/publication/3207696_Patents_software_and_hardware_for_PID_control_An_overview_and_analysis_of_the_current_art > (Last accessed October 6, 2025)

11. Derakhshan, S & Nourbakhsh, A 2008, 'Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation', *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, no. 8, Pp. 1620-1627.

12. Andreyev, OV, Zagrebelna, LO & Kobec, OV 2021, 'Conversion of characteristics of centrifugal pumps to viscous liquids', *Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya*, no 1, Pp. 21-31. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-5364.2021.1.03 (Last accessed October 6, 2025)

13. Kramarenko, you & Drozd, VA 2023, 'Pidvishennya yakosti nasosnih ustanovok shlyahom udoskonalennya sistem keruvannya' [Improving the quality of pump installations through the en-hancement of control systems], *Engineering*, iss. 32, Pp. 29-36. DOI https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-29-36 (Last accessed October 6, 2025)

14. Kanyuk, GI, Andreyev, OV, Chernyuk, AM & Knyazyeva, VM 2016, 'Analysis of the Tools Used to Control the Parameters of Pump Units Intended for Oil-Trunk Pipelines in Ukraine', *Visnik NTU "HPI": Energetichni ta teplotehnichni procesi j ustatkuvannya*, no 10(1182), Pp. 85-91. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-774X.2016.10.13 (Last accessed October 6, 2025)

Submission received: 10/06/2025 Accepted: 11/12/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-09
УДК 621.311.22

[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]**С. В. НАСИРОВ**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: nasirov1980@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3393-0291
[1]*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,*
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ

В статті наведено результати аналізу існуючого нормативного забезпечення щодо підвищення якості роботи газоперекачувальних станцій та їх елементів, основними з яких є компресорні установки. Показано, що для забезпечення високих показників якості роботи газоперекачувальних станцій та їх елементів, існує ряд нормативних документів, які розглядають питання експлуатації, метрології, випробувань, енергозбереження та інші важливі напрями, спрямовані на підвищення та підтримку показників якості, які повинні відповідати міжнародним стандартам. Наведені основні показники якості роботи газоперекачувальних станцій, які розділяються на технічні та економічні. Визначено потенціал підвищення енергетичної ефективності, що є одним з головних технічних показників якості роботи. Показано, що потенціал підвищення енергетичної ефективності є граничною величиною підвищення ефективності роботи обладнання газоперекачувальних станцій. Встановлено, що можливість реалізації цього показника залежить від конкретних умов роботи газопровідної системи, а також від можливості підвищення технічного стану газотурбінної установки. Визначені недоліки існуючого нормативного забезпечення, а саме: бракує нормативних методик створення автоматизованих систем керування, які гарантують високі показники якості роботи газоперекачувальних станцій, насамперед, коефіцієнта корисної дій, підвищення якого можливо шляхом зменшення усіх видів втрат енергії. Визначені задачі щодо подальшого удосконалення нормативного забезпечення України: поглиблене проведення теоретичних та експериментальних досліджень, удосконалення математичних моделей основного обладнання газоперекачувальних станцій та систем керування; перевірка адекватності удосконалених математичних моделей за експериментальними характеристиками; виконання структурно-параметричного синтезу енергоефективних систем керування. З метою структуризації нормативних документів та пошуку ефективних напрямів підвищення показників якості газоперекачувальних станцій, розроблено класифікацію існуючого нормативного забезпечення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, нормативне забезпечення, компресорні установки, газоперекачувальні станції, енергозбереження.

Як цитувати: Мезеря А. Ю., Насиров С. В. Аналіз нормативної бази забезпечення високих показників якості роботи газоперекачувальних станцій. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 92-101. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-09

© Мезеря А. Ю., Насиров С. В. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

Газотранспортна система (ГТС) України – це дуже розгалужена мережа магістральних нафтопроводів та вузлових газоперекачувальних станцій, які забезпечують зберігання та транспортування газу. На сьогодні, газотранспортна система України займає друге місце за потужністю в Європі. Потужність ГТС України досить велика й в загальносвітовому масштабі. Газотранспортна система України входить до складу загальноєвропейської газової мережі. Потужність ГТС та її роль на світовому ринку транспортування природного газу висувають високі вимоги щодо показників якості її роботи.

З урахуванням геополітичної та інфраструктурної ситуації в Україні забезпечення безперебійної роботи магістральних газопроводів та станцій компримування має стратегічне значення – як у плані внутрішнього постачання, так і в плані транзиту газу. Підвищення якості роботи компресорів сприяє зниженню операційних витрат, що особливо важливо за умов обмеженого капіталу та підвищених ризиків.

Поширюються екологічні вимоги до викидів, що відповідають міжнародним зобов'язанням. Підвищення якості роботи компресорного обладнання дозволить відповідати міжнародним стандартам та призведе до зменшення вартості транспортування природного газу та підвищення конкурентоспроможності української ГТС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В науковій літературі питання підвищення показників якості компресорних установок та газоперекачувальних станцій освітлено достатньо повно. Зазначається, що підвищення ефективності обладнання та системи в цілому дозволяє зменшити паливні (енергетичні) витрати на одиницю газу, що перекачується. [1]. При погіршенні якості компресора, наприклад зниження аеродинамічної ефективності, збільшення втрат, робота поза оптимальним режимом – зростають витрати на енергію, паливо, відбувається зниження ККД. При задовільній роботі компресора можна забезпечити заявлені параметри тиску, об'ємів, що є важливим для стійкої роботи магістральних газопроводів. Таким чином, підвищення якості дозволяє задовольняти зростаючий попит та підтримувати гнучкість експлуатації [1]. Якість паливагазу, склад, наявність домішок впливають працювати компресора (корозія, знос). Необхідні системні методи: як заміна устаткування, а й оптимізація управління, моніторинг стану, застосування сучасних алгоритмів аналізу даних [2]. Наприклад, одним із напрямків є застосування «online feedback optimization» та адаптивних моделей [3].

Увага приділяється показникам надійності обладнання газоперекачувальних станцій. В роботі [4] встановлені методики визначення цих показників та шляхи їх підвищення.

Велика увага вітчизняних та закордонних вчених приділяється системам керування елементами газоперекачувальних станцій. Розглядаються питання оптимізації ПІД-регуляторів. В роботі [5] визначаються оптимальні значення швидкості компресорних установок, які повинна забезпечувати система керування з метою отримання високих показників якості. Розглядаються питання енергозбереження в системах керування компресорними станціями та визначаються відповідні алгоритми керування [6], структури систем керування [7] та розумні системи керування, спрямовані на забезпечення високих показників якості [8]. Удосконалюються загальні теорії оптимального керування [9]. Удосконалюється робота обладнання, що призводить до покращення технічних показників якості, а саме: підвищення показників надійності [10], екологічності [11] та експлуатаційних показників [12].

Проводяться дослідження та удосконалюються методи діагностування витоків з газопроводу на основі дослідження процесу розповсюдження збурень [13], що покращує показники екологічності. Особливу увагу приділяється питанню підвищення енергоефективності, який є одним з основних технічних показників

якості. В роботі [14] наведено методику визначення енергоефективності газоперекачувальних агрегатів в умовах компресорних станцій, в роботі [15] наведено методику прогнозування нестаціонарних процесів в газотранспортних системах за умови їх неповного завантаження, що вкрай важливо як для надійності, так і для енергозбереження. Проводяться дослідження з питань підвищення ефективності роботи газоперекачувальних станцій шляхом оптимізації електроприводів [16].

На ряду з тим, бракує алгоритмів та методик визначення та підтримки режимів роботи компресорного обладнання, які б гарантовано забезпечували високі показники якості обладнання газоперекачувальних станцій. Відсутність відповідних методик та відповідних нормативних документів не дозволяє в повній мірі використовувати корисні наробки в практиці експлуатації.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз нормативного забезпечення України щодо підвищення показників якості роботи елементів газотранспортної системи України та визначення шляхів його удосконалення.

Виклад основного матеріалу

На газоперекачувальних станціях в основному використовуються відцентрові компресори, які забезпечують високу продуктивність при потужності (4-25 МВт) та ККД (0,8-0,85), а також малі габаритні розміри та маси.

Показники якості роботи газоперекачувальних станцій та магістральних газопроводів розділяються на технічні та економічні.

До технічних показників якості відносяться: 1. Показники призначення (показники продуктивності ГПС, показники енергетичної ефективності, показники експлуатаційної ефективності, показники якості систем керування; 2. Показники надійності; 3. Ергономічні показники; 4. Багатофункціональність; 5. Показники безпеки газоперекачувальних станцій; 6. Екологічні показники ГПС; 7. Показники утилізації; 8. Показники проектно-технологічної стандартизації та уніфікації; 10. Правові показники.

До економічних показників ГПС відносять: 1. Собівартість транспортування природного газу; 2. Кінцева вартість природного газу з боку кінцевого споживача, до якого здійснюється транзит; 3. Витрати на експлуатацію (вартість електричної енергії на власні потреби ГПС, вартість витратних матеріалів, запасних деталей та інструменту, вартість обслуговування елементів ГПС, вартість ремонту обладнання ГПС та їх утилізації).

Одним з головних технічних показників якості я показник енергетичної ефективності.

Потенціал підвищення енергетичної ефективності можна виразити у відсотках:

$$П=100-E, \qquad (1)$$

де E – показник відносної ефективності, що визначається за такою формулою:

$$E=\frac{\eta}{\eta_{\text{ном}}}100\% \ , \qquad (2)$$

де $\eta, \eta_{\text{ном}}$ – діючий та номінальний коефіцієнт корисної дії.

Потенціал підвищення енергетичної ефективності є граничною величиною підвищення ефективності роботи обладнання ГПС. Можливість реалізації цього показника залежить від конкретних умов роботи газопровідної системи, а також від можливості підвищення технічного стану газотурбінної установки.

Для забезпечення високих показників якості роботи газоперекачувальних станцій та їх елементів, існує ряд нормативних документів. Існуючі нормативні документи розглядають питання експлуатації, метрології, випробувань, енергозбереження та інші важливі напрями, спрямовані на підвищення та підтримку показників якості, які повинні відповідати міжнародним стандартам. Проведено аналіз існуючих нормативних документів, короткий зміст якого показано в таблиці 1.

Таблиця 1

Короткий аналіз нормативних документів, спрямованих на забезпечення високих показників якості ГПС та її елементів

Table 1

Brief analysis of regulatory documents aimed at ensuring high quality indicators of GPS and its elements

	Стандарт	Короткий аналіз змісту
	ДСТУ EN 12583:2017	Визначаються вимоги щодо визначення загальних функційних вимог до компресорних станцій та методики визначення тарифів при транспортуванні природного газу
	ДСТУ 4314:2004	Нормативний документ встановлює базові поняття щодо газопровідних систем, узгоджується термінологія з урахуванням сучасного стилю української мови з метою усунення суперечності
	СОУ 60.3-30019801-100:2012	Норматив визначає обсяги необхідних технологічних потреб природного газу під час його транспортування, а також під час експлуатації підземних газосховищ. Стандартизує розрахунки обсягів витрат паливного і пускового газу газоперекачувальних агрегатів, технологічного газу, необхідного для роботи газотранспортної системи
	ДСТУ 2226-93	Стандарт описує терміни та визначає основні поняття у галузі автоматизованих систем керування. Містить відомості щодо АСУ, які використовуються в загальнопромислових технологічних системах керування та переробки інформації
	ДСТУ 2709-94	Нормативний документ поширюється на автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСК ТП). Визначає на стадії створення АСУ основні положення метрологічного забезпечення
	ДСТУ 3626-97	Документ регламентує та описує вимоги щодо базових програмно-технічних комплексів локального рівня для розосереджених автоматизованих систем керування технологічними процесами. Визначає вимоги щодо АСУ окремих агрегатів, агрегатних комплексів, інтегрованих АСУ ТП, як в промислові сфері, так і в сфері побуту та соціології. Розповсюджується на локальний рівень розосереджених АСУ з ієрархічною структурою
	ДСТУ 4134-2002	Документ визначає методики виконання вимірювань. Встановлює порядок вимірювання вимірювальними каналами вимірювально-інформаційних систем і АСК ТП. Визначає похибки та їх характеристики для практичного використання в розрахунках. Документ визначає вимоги до структури та змісту вимірювання параметрів на підставі метрологічних характеристик вимірювальних засобів
	ДСТУ 3809-98	Документ регламентує загальні терміни та визначення понять стосовно компресорних установок
	ДСТУ ISO 10439:2013, ДСТУ EN ISO 10439-1:2022, ДСТУ EN ISO 10439-2:2022, ДСТУ EN ISO 10439-3:2022, ДСТУ EN ISO 10439-4:2022	Встановлюють вимоги щодо вибору конструкції та матеріалів, приладів контролю та вимірювань відцентрових, осьових та детандер-компресорах для використання в газовій промисловості тощо
0	ДСТУ EN ISO 10440-1:2022	Регламентуються параметри та вибір об’ємних компресорів роторного типу
1	ДСТУ 3160-95	Розглядаються загальні вимоги щодо вібраційних характеристик компресорних установок, оцінка вібраційної безпеки, та показників надійності. Також регламентуються методи визначення та отримання вібраційних характеристик компресорних установок
2	ДСТУ 3161-95	Встановлено методи визначення та норми характеристик щодо вібрації компресорів, та трубопроводів, на які він працює

3	ДСТУ EN 1012-1:2014, ДСТУ EN 1012-1:2018, ДСТУ EN 1012-3:2019	Визначено розподіл вимог до компресорів технологічного газу. Крім того, встановлено вимоги до компресорів для повітря, азоту та інших інертних газів
4	ДСТУ ISO 13631:2010, ДСТУ EN ISO 13631:2022	Регламентує характеристики поршневих компресорів, а саме технічні вимоги та вимоги щодо визначення характеристик компресорів наступних типів: консольні компресори; беззмащувальні компресори; компресори з поршнями відкритого типу (автомобільного типу), які діють як крейцкопфи; компресори системи стисненого повітря або компресори для технічного повітря з тиском на нагнітанні до 0,9 МПа (9 бар); компресори з дизельним двигуном або з приводом від парової чи газової турбіни; відокремлюваних або інтегрованих компресорів, які мають циліндри зі змащуванням та використовуються у газовій промисловості
5	ДСТУ ISO 13707:2010	Встановлює вимоги до компресорів зворотно-поступальної дії помірно- або малообертових, а також на компресори, які працюють у небезпечних виробництвах. Нормативний документи встановлюють вимоги до систем змащування, керування та контрольно-вимірювальних систем компресорних установок
6	ДСТУ 4110-2002	Наведено методики енергозбереження та рекомендації щодо планування роботи промислового обладнання. Розроблено вимоги до визначення енергобалансу та впорядкування інформації, яка використовується при аналізі рівня енергозбереження
7	ДСТУ 3682-98	Наведено методику визначення енергоємності продукції
8	ДСТУ 3886-99	Визначено методи аналізу рівня енергозбереження в системах електроприводу та методики його вибору за критерієм енергоефективності. Встановлює вимоги до розрахунку основних технічних параметрів (потужність, струм, коефіцієнт завантаження тощо). Визначає вимоги щодо енергоаудиту механізмів з електроприводом та рекомендації до їх використання
9	ДСТУ 5003.3-1:2008	Має за мету створити та регламентувати єдину технічну політику та упорядкувати процеси та розвиток систем автоматичного обліку електричної енергії та забезпечити на основі цього енергозберігаючі заходи
0	ДСТУ 4715:2007	Документ встановлює необхідний склад та регламентує зміст робіт на стадіях розробки та запровадження систем енергетичного менеджменту
1	ДСТУ 4713:2007	Документ визначає порядок проведення та вимоги до енергетичного аудиту, а саме етапи аудиту, збирання та аналізу інформації, розробки енергозберігаючих заходів та аналіз їх ефективності
2	ДСТУ 5077:2008	Документ визначає порядок перевірки ефективності систем енергетичного менеджменту на виробництві, а також контроль та корекція цих систем при експлуатації та модернізації

Аналіз існуючого нормативного забезпечення щодо питання якості газоперекачувальних станцій виявив ряд недоліків, а саме: бракує нормативних методик створення автоматизованих систем керування, які гарантують високі показники якості роботи газоперекачувальних станцій, а саме одного з основних критеріїв якості – коефіцієнта корисної дій, підвищення якого можливо шляхом зменшення усіх видів втрат енергії в ГПС, тобто бракує методик створення енергоефективних систем керування, які працюють за критерієм мінімуму сумарних втрат енергії. Для створення та впровадження таких методів, необхідно виконання низки задач:

проведення теоретичних та експериментальних досліджень, математичне моделювання основного обладнання ГПС та перевірка їх адекватності за експериментальними характеристиками, виконання структурно-параметричного синтезу енергоефективних систем керування.

З метою наочної уяви структури нормативного забезпечення та спрощення пошуку шляхів підвищення показників якості роботи газоперекачувальних станцій та їх окремих елементів, розроблено класифікацію існуючих стандартів за відповідними напрямами. Класифікація нормативних документів зображена на рис. 1.

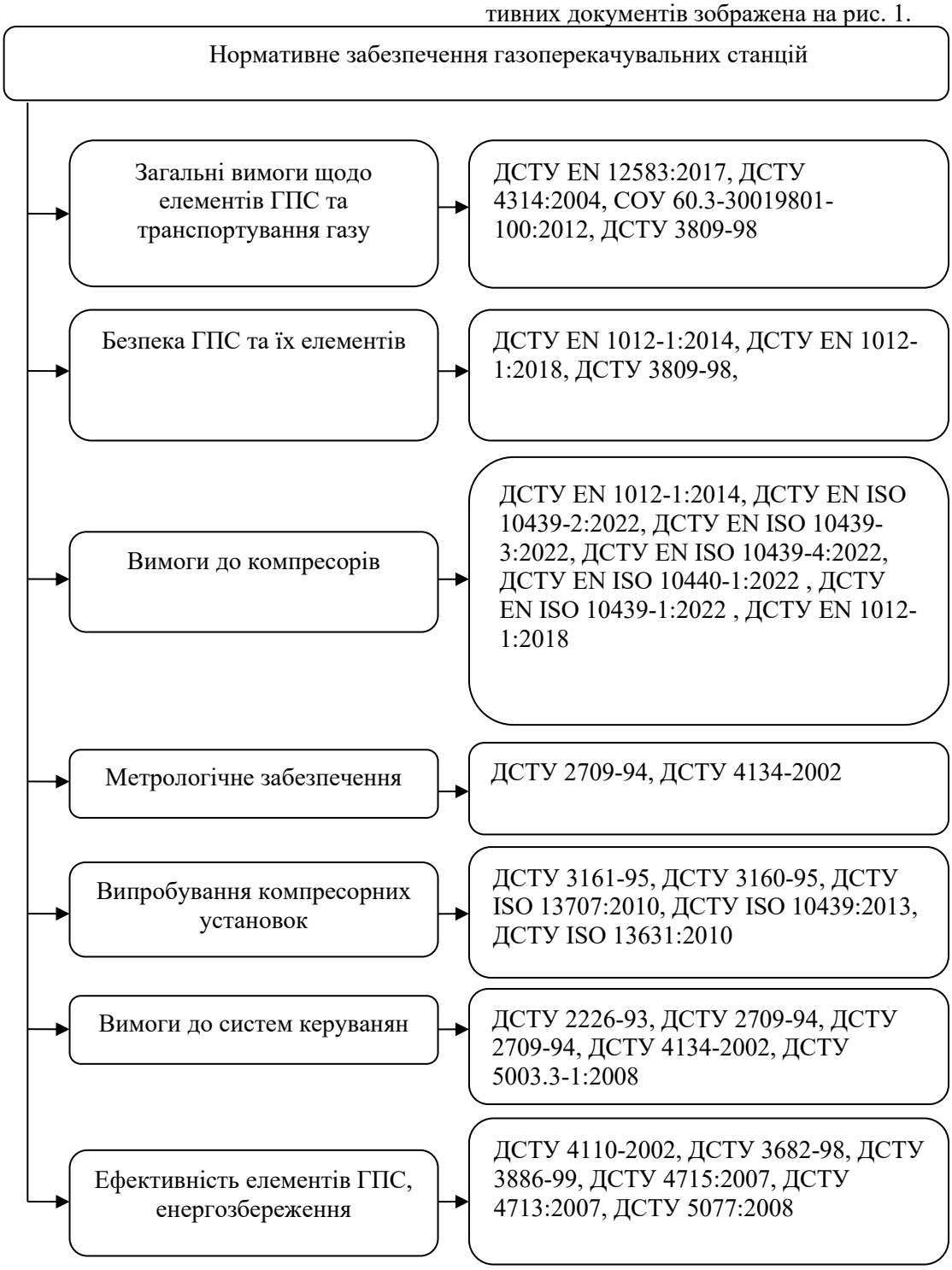

Рис. 1 – Структура нормативних документів щодо забезпечення якості газоперекачувальних станцій

Fig. 1 – Structure of regulatory documents for quality assurance of gas pumping stations

Висновки

Основними елементами, які впливають на показники якості газоперекачувальних станцій та всієї газотранспортної системи є газоперекачувальні агрегати (газова турбіна та компресор). Показники якості роботи саме цих агрегатів суттєво впливають на загальну якість роботи всієї газоперекачувальної станції та системи транспортуванння природного газу. Основною статтею витрати газу на власні потреби газоперекачувальної станції (понад 80%) є витрата паливного газу на роботу газоперекачувальних агрегатів, тому саме цьому треба приділяти найбільшу увагу при вирішенні задачі підвищення показників якості систем транспортування газу.

Проведено аналіз існуючого нормативного забезпечення щодо питання якості газоперекачувальних станцій, який показав, що бракує нормативних методик створення автоматизованих систем керування, які гарантують високі показники якості роботи газоперекачувальних станцій, а саме одного з основних критеріїв якості – коефіцієнта корисної дій, підвищення якого можливо шляхом зменшення усіх видів втрат енергії в ГПС, тобто бракує методик створення енергоефективних систем керування, які працюють за критерієм мінімуму сумарних втрат енергії. Необхідно проведення теоретичних та експериментальних досліджень та створення таких систем.

З метою структуризації нормативних документів та пошуку ефективних напрямів підвищення показників якості газоперекачувальних станцій, розроблено класифікацію існуючого нормативного забезпечення.

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. Rainer K. Optimization of compressor stations / Kurz Rainer // Journal of the Global Power and Propulsion Society. 2019. 3: 668–674 https://doi.org/10.33737/jgpps/112399

2. Нечаєва Т.П. Фактори екологічного впливу електроенергетичних об'єктів на довкілля / Т.П. Нечаєва, С.В. Шульженко., Д.П. Сас, М.В. Парасюк // Проблеми загальної енергетики. 2008. № 18. –С. 54-60. Доступ: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2008_18_13 (дата звернення 10.11.2025)

3. Zagorowska M. Online Feedback Optimization of Compressor Stations with Model Adaptation using Gaussian Process Regression / M. Zagorowska, M. Degner, L. Ortmann, A. Ahmed, S. Bolognani, E. A. del Rio Chanona, M. Mercangoz // Electrical Engineering and Systems Science. Systems and Control. 2022. –P. 1-40. https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.03604

4. Копей Б.В. Підвищення надійності газотранспортних систем: монографія / Б.В. Копей, А. Бенмуна, В.І. Слободян, А. Беллауар, С.І. Галій, Д. Халімі, А.М. Найда // Серія «Нафтогазове обладнання», том 8 – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 300 с. ISBN 978-966-694-174-2

5. Mohamed S. Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: Case study / S. Mohamed, R. El-Maghraby, F. Mohamed // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. 2022. 29(00):18-18. DOI:10.2298/CICEQ220318018S

6. Wang H.J. The Research of Energy-saving in Air Conditioning Water Cooling System by Frequency Conversion Pump and Constant Pressure Control. / H.J. Wang, F. Wang, Y.Y. Huang, L. Zhang // Applied Mechanics and Materials. 2nd International Conference on Mechanics and Control Engineering, Beijing, 2014, vol. 446–447, pp. 1207–1210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1207 (дата звернення 10.11.2025)

7. Xiuhe L. Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving / L. Xiuhe // International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun. – 2010. – Vol. 3. – № 610276. – P. 431-434. DOI:

10.1109/CMCE.2010.5610276
https://www.researchgate.net/publication/251959311_Section_variable_frequency_speed_regulation_control_applied_in_pump_energy_saving

8. Yang, S. Intelligent Control Technology for Frequency Conversion Pump in Air Conditioning Systems / S. Yang, Q. Ren // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2013. – Vol. 180 AISC. – P. 665-669. DOI: 10.1007/978-3-642-31656-2_9

9. Ciontu M. Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni / M. Ciontu, D. Popescu, M. Motocu // Published in International Conference on… 11 November 2010. Engineering, Environmental Science. DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409

10. Гура Л.О. Газоперекачувальні станції магістральних газопроводів / Л.О. Гура. – Х.: НТУ "ХПІ", 2006. –182 с. Доступ: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjvw5mDp-qPAxUuFBAIHebBN40QFnoECCMQAQ&url=https%3A%2F%2Fcyberleninka.ru%2Farticle%2Fn%2Fmodel-planirovaniya-otsenki-kontroliruemyh-pokazateley-v-territorialno-raspredelennoy-sisteme-monitoringa-transporta-gaza%2Fpdf&usg=AOvVaw0zNNGOWuJm2FBLEHwaQg9U&opi=89978449 (дата звернення 10.11.2025)

11. Булат А.Ф. Компресорне устаткування в технологіях видобутку вуглеводнів: монографія / А.Ф. Булат, Г.В. Кирик, Г.А. Бондаренко та ін. ; за заг. ред. акад. НАН України А.Ф. Булата. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 305 с. ISBN 978-966-657-643-2

12. Bondarenko H.A. A new approach to decigning the s-shaped annular duct for in industrial centrifugal compressor / H.A. Bondarenko, I.V. Yurko // Interactional Journal of Rotating Machinery. – 2014. Article I.D.925368, 10 pages. ISSN 1542-3034.

13. Грудз В.Я. Удосконалення методу діагностування витоків з газопроводу на основі дослідження процесу розповсюдження збурень / В.Я. Грудз, В.Я. Грудз (мол) // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2017. – № 1. – С. 217-225. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pvntsh_ch_2017_1_25 (дата звернення 10.11.2025)

14. Грудз Я.В. Оцінка енергоефективності газоперекачувальних агрегатів в умовах компресорних станцій / Я.В. Грудз // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2012. - № 2. –С.1-10. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2012_2_17 (дата звернення 10.11.2025)

15. Грудз В. Я. Прогнозування нестаціонарних процесів в газотранспортних системах за умови їх неповного завантаження / В.Я. Грудз, В.Я. Грудз (мол.) // Нафтогазова енергетика. – 2017. – № 2. – С. 62-68. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2017_2_7 (дата звернення 10.11.2025)

16. Князєва В. М. Підвищення енергетичної ефективності транспортування газу шляхом оптимізації режимів роботи електроприводів / В.М. Князєва, С.В. Носиров, В. Є. Малюта, М.О. Курільченко, В.Б. Колесник // Збірник наукових праць «Машинобудування». – Харків. – №32. –2023. –С.64-71 https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-64-71

Отримано: 03.10.2025 Прийнято: 10.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[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]**S. NASIROV**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: nasirov1980@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0009-3393-0291
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.

ANALYSIS OF THE REGULATORY BASE FOR ENSURING HIGH INDICATORS OF THE WORK QUALITY OF GAS PUMPING STATIONS

The article presents the results of the analysis of existing regulatory support for improving the quality of work of gas pumping stations and their elements, the main of which are compressor units. It is shown that in order to ensure high quality indicators of the work of gas pumping stations and their elements, there are a number of regulatory documents that consider the issues of operation, metrology, testing, energy saving and other important areas aimed at increasing and maintaining quality indicators that must meet international standards. The main indicators of the quality of work of gas pumping stations, which are divided into technical and economic, are given. The potential of increasing energy efficiency, which is one of the main technical indicators of the quality of work, has been determined. It is shown that the potential for increasing energy efficiency is the limiting value for increasing the efficiency of gas pumping station equipment. It was established that the possibility of realizing this indicator depends on the specific conditions of the gas pipeline system, as well as on the possibility of improving the technical condition of the gas turbine installation. The shortcomings of the existing regulatory framework have been identified, namely: there is a lack of regulatory methods for creating automated control systems that guarantee high quality indicators of gas pumping stations, first of all, the efficiency ratio, which can be increased by reducing all types of energy losses. Identified tasks regarding the further improvement of regulatory support of Ukraine: in-depth theoretical and experimental research, improvement of mathematical models of the main equipment of gas pumping stations and control systems; checking the adequacy of improved mathematical models according to experimental characteristics; implementation of structural and parametric synthesis of energy-efficient control systems. For the purpose of structuring regulatory documents and finding effective directions for improving the quality indicators of gas pumping stations, a classification of existing regulatory support was developed.

***Keywords*:** quality indicators, regulatory support, compressor units, gas pumping stations, energy saving.

In cites: Mezerya A., Nasirov S. (2025), Analysis of the regulatory base for ensuring high indicators of the work quality of gas pumping stations. *Engineering, (36),* 92-101. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-09 (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.

Reference:

1. Kurz R. 2019, 'Optimization of compressor stations.' *Journal of the Global Power and Propulsion Society,* Iss. 3, Pp. 668–674, DOI: https://doi.org/10.33737/jgpps/112399

2. Nechayeva, TP, Shulzhenko, SV, Sas, DP & Parasyuk, MV 2008, 'Faktori ekologichnogo vplivu elektroenergetichnih ob'yektiv na dovkillya' [Factors of environmental impact of power plants on the environment], Problemi zagalnoyi energetiki, № 18. Pp. 54-60, viewed <http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2008_18_13 > (Last accessed November 10, 2025)

3. M. Zagorowska, M. Degner, L. Ortmann, A. Ahmed, S. Bolognani, E. A. del Rio Chanona, M. Mercangoz. 'Online Feedback Optimization of Compressor Stations with Model Adaptation using Gaussian Process Regression' Electrical Engineering and Systems Science. Systems and Control. 2022. Pp. 1-40. https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.03604

4. Kopej, BV, Benmuna, A, Slobodyan, VI, Bellauar, A, Galij, SI, Halimi, D & Najda, AM 2012, Pidvishennya nadijnosti gazotransportnih sistem [Increasing the reliability of gas transportation systems], IFNTUNG, Ivano-Frankivsk

5. EVALUATION OF VARIABLE SPEED DRIVES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY AND REDUCE GAS EMISSIONS: CASE STUDY: Scientific paper. (2023). Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly, 29(2), 111-118. https://doi.org/10.2298/CICEQ220318018S

6. Wang, HJ, Wang, F, Huang, YY & Zhang, L 2014, 'The Research of Energy-saving in Air Conditioning Water Cooling System by Frequency Conversion Pump and Constant Pressure Control', Applied Mechanics and Materials. 2nd International Conference on Mechanics and Control Engineering, Beijing, vol. 446–447, pp. 1207–1210. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.1207

7. Xiuhe, L 2010, 'Section Variable Frequency Speed Regulation Control Applied in Pump Energy Saving', International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering, Changchun, Vol. 3, № 610276, Pp. 431-434, DOI: 10.1109/CMCE.2010.5610276 https://www.researchgate.net/publication/251959311_Section_variable_frequency_speed_regulation_control_applied_in_pump_energy_saving

8. Yang, S & Ren, Q 2013, 'Intelligent Control Technology for Frequency Conversion Pump in Air Conditioning Systems', Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 180, Pp. 665-669. DOI: 10.1007/978-3-642-31656-2_9

9. Ciontu, M, Popescu, D & Motocu, M 2010, 'Analysis of energy efficiency by replacing the throttle valve with variable speed drive condensate pump from E.C. Turceni', Published in International Conference on… 11 November 2010. Engineering, Environmental Science, DOI:10.1109/ISEEE.2010.5628495 Corpus ID: 11478409

10. Gura, LO 2006, Gazoperekachuvalni stanciyi magistralnih gazoprovodiv [Gas pumping stations of main gas pipelines], NTU "HPI", Kharkiv

11. Bulat, AF, Kirik, GV, Bondarenko, GA et al 2016, *Kompresorne ustatkuvannya v tehnologiyah vidobutku vuglevodniv* [Compressor equipment in hydrocarbon production technologies], Sumi

12. Bondarenko, HA & Yurko, IV 2014, 'A new approach to decigning the s-shaped annular duct for in industrial centrifugal compressor' , Interactional Journal of Rotating Machinery, Article 925368.

13. Grudz, VYa & Grudz, VYa (mol) 2017, 'Udoskonalennya metodu diagnostuvannya vitokiv z gazoprovodu na osnovi doslidzhennya procesu rozpovsyudzhennya zburen' [Improvement of the method of diagnosing gas pipeline leaks based on the study of the process of breaking down the blockages], Prikarpatskij visnik NTSh, . – № 1, Pp. 217-225.

14. Grudz, YaV 2012, 'Ocinka energoefektivnosti gazoperekachuvalnih agregativ v umovah kompresornih stancij' [Assessment of energy efficiency of gas pumping units in compressor stations.], Naukovij visnik Ivano-Frankivskogo nacionalnogo tehnichnogo universitetu nafti i gazu, № 2, Pp. 1-10.

15 Grudz, VYa & Grudz, VYa (mol) 2017, 'Prognozuvannya nestacionarnih procesiv v gazotransportnih sistemah za umovi yih nepovnogo zavantazhennya' [Forecasting of non-stationary processes in gas transportation systems under conditions of their non-load.], Naftogazova energetika, № 2, Pp. 62-68.

16. Knyazyeva, VM, Nosirov, SV, Malyuta, VYe, Kurilchenko, MO & Kolesnik, VB 2023, 'Pidvishennya energetichnoyi efektivnosti transportuvannya gazu shlyahom optimizaciyi rezhimiv roboti elektroprivodiv' [Increasing the energy efficiency of gas transportation by optimizing the operating modes of electric drives], *Engineering,*, Iss. 32, Pp. 64-71, DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-64-71 (Last accessed November 10, 2025)

Submission received: 10/03/2025 Accepted: 11/10/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10
УДК 658.62.018.012

[1]А. Я. ЛИСЕНКО,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: dagost@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3916-8029
[1]Р. С. НОС,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: nosruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5391-7703
[1]К. І. МАЗОРЧУК,
аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: ekaterina.mazorchuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0769-4872
[1]С. С НЕГОДОВ,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: titansv2017@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3561-6924
[1]Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

УДОСКОНАЛЕННЯ КВАЛІМЕТРИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ЕНЕРГОПІДПРИЄМСТВ З УРАХУВАННЯМ АСПЕКТІВ КІБЕРБЕЗПЕКИ

У статті розглянуто можливість застосування кваліметричних підходів до оцінювання ризиків з урахування сучасних аспектів кіберзагроз, що виникають на енергетичних підприємствах. З метою оцінювання і управління ризиками проаналізовано науко-технічну і нормативну базу і запропоновано алгоритм-схему яка враховує кіберкомпонент, який є як окремою загрозою для функціонування енергопідприємства, так і може впливати на інші загрози різного характеру, і як наслідок підвищити рівень загального ризику. У ході проведеного дослідження було розроблено науково-обґрунтовану методику оцінювання рівня безпеки підприємства з урахуванням кіберзагроз. Запропонований підхід поєднує кваліметричні методи та модифіковану систему вагових коефіцієнтів, що дало змогу сформувати інтегральну модель аналізу ризиків, що забезпечує більш комплексне уявлення про стан захищеності об'єкта та дає можливість своєчасно виявляти критичні вразливості як на етапі планування заходів безпеки, так і під час ухвалення управлінських рішень у процесі функціонування. У дослідженні проаналізовано базові загрози для атомної електростанції, що дозволило ідентифікувати приховані загрози, а саме, встановлено, що відмова систем охолодження може бути спричинена не лише фізичними несправностями, а й цілеспрямованим втручанням у програмне забезпечення чи спотворенням сигналів датчиків, що враховано під час оцінки ризиків. В роботі представлено візуалізація оцінювання ризиків у вигляді 3D матриці ризиків з кіберкомпонентом, яка дає краще уявлення та допомагає керівникам енергопідприємств швидко ідентифікувати найбільш критичні ризики, у яких кіберфактор суттєво посилює загрозу. Застосування інтегральної моделі засвідчило, що фактичний рівень ризиків атомної електростанції істотно зростає за рахунок кіберкомпонента. У порівнянні з базовим варіантом оцінювання, інтегральний показник ризику з врахуванням кіберкомпонента підвищується на 10–25 %, що підтверджує необхідність системного включення заходів кіберзахисту до загальної політики безпеки атомної енергетики.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ризик, кваліметричний підхід, енергетичні підприємства, кіберзагрози, оцінювання, матриці ризику

Як цитувати: 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. Вип. 36. С. 102-118. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10

© Лисенко А. Я., Нос Р. С., Мазорчук К. І., Негодов С. С. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

У сучасних умовах динамічного розвитку технологій та підвищення вимог до безпеки підприємств, процес оцінювання ризиків стає невід'ємним елементом ефективного управління якістю функціонування та забезпечення відповідності нормативним вимогам та параметрам. Ризики можуть виникати на всіх етапах життєвого циклу підприємства - від проектування та виробництва (функціонування) до експлуатації в позапроєктні терміни, зняття з експлуатації та утилізації відпрацьованих матеріалів та обладнання. Своєчасна ідентифікація та мінімізація ризиків дозволяє не лише запобігти потенційним загрозам для соціума та навколишнього середовища, але й оптимізувати процеси, зменшити витрати та підвищити конкурентоспроможність підприємства.

Сучасні енергопідприємства функціонують у складному середовищі, що зумовлено постійними змінами, як вихідних параметрів, так і вимог до процесів, де ефективність виробництва та надійність постачання енергії залежать не лише від технічного стану обладнання, а й від здатності своєчасно ідентифікувати та мінімізувати ризики. Цифровізація енергетичної галузі, що передбачає впровадження автоматизованих систем управління, інтелектуальних мереж (smart grids), інтернету речей (IoT) та технологій великих даних (Big Data), значно розширює можливості функціонування, забезпечення безпеки, моніторингу та прогнозування подальшого технічного стану, але водночас створює нові виклики і загрози.

В умовах переходу до «цифрової енергетики» традиційні підходи до оцінювання ризиків втрачають ефективність, адже зростає кількість потенційних загроз, зокрема кіберризиків, техногенних аварій, збоїв у цифрових системах управління та помилок у роботі алгоритмів функціонування, що потребує удосконалення методології ризик-менеджменту з урахуванням інтеграції цифрових технологій, забезпечення кібербезпеки та підвищення стійкості інфраструктури до комплексних впливів.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у необхідності формування сучасних методів оцінювання ризиків для енергопідприємств, які здатні адаптуватися до умов цифровізації та забезпечити безперервність, безпеку й ефективність енергетичних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Кваліметричний підхід, як один з науково-практичних методів, використовують до кількісної оцінки якості складних об'єктів і процесів шляхом побудови інтегральних показників на безрозмірних шкалах, нормування та зважування компонентів якості, що успішно впроваджується та досліджується науковцями в машинобудуванні, харчовій промисловості, енергетичній сфері, фінансовій діяльності, освіті, тощо [1-5]. У застосуванні до ризик-менеджменту кВаліметричні методи дозволяють перетворити якісні (експертні) судження про фактори ризику у формалізовані числові показники, що спрощує ранжування ризиків та прийняття управлінських рішень [6, 7].

У класичних кваліметричних схемах використовують багатоступеневе зважування критеріїв (експертні ваги), приведення показників до єдиної безрозмірної шкали (нормалізація), та агрегування (сума, зважена сума або складніші функції). Для частини ідентифікації та оцінювання ризиків, в якості інструментів використовують матриці оцінок, шкали Лайкерта, методи ранжування та багатокритеріальний аналіз [8-10]. Сучасні роботи також пропонують отримувати розподіли показників і ризиків через статистичне моделювання щільності оцінок, що дає змогу визначати ймовірнісні інтервали ризику [11, 12].

У енергетичному секторі використовуються як суто кількісні підходи (QRA, Monte-Carlo), так і напівкількісні та кваліметричні методики для швидкої рангової оцінки великої кількості ризиків: технічних, організаційних, екологічних та дедалі частіше апелюють до необхідності врахування кіберризиків. Практичні посібники для енергетичної інфраструктури під креслюють важливість поєднання якісних експертних оцінок з кількісними інструмент-тами, аби методика була водночас обґрунтованою, прозорою та застосовною у ресурсних обмеженнях, адже часто прогнозування ризиків ускладнено у звязку з обмеженістю статистичної інформації [13-16].

Останні дослідження [17-19] показують, що для енергопідприємств ефективна методика повинна бути багаторівневою: (1) інвентаризація об'єктів/систем, (2) ідентифікація загроз і вразливостей, (3) експертне присвоєння показників якості/уразливості, (4) нормалізація та агрегування у інтегральний ризик. У роботах [20-22], що досліджують енергетику та суміжні галузі (нафтогаз, відновлювана енергетика), відзначається тренд до комбінування кваліметричних оцінок з моделями часово-залежного ризику і сценарним аналізом. Іншим напрямом досліджень, є розгляд можливості поєднання кваліметрії з інструментами машинного навчання, аналізом великих даних і онлайн-моніторингом, що дає змогу автоматизувати збір оцінок, уточнювати вагові коефіцієнти на основі ретроспективних даних, щодо інцидентів, збоїв, відмов, моделювати розподіли ймовірностей та оперативно перераховувати інтегральні ризики у разі зміни стану системи. Особливо важливим стає включення окремих кіберпоказників у загальну кваліметричну модель (уразливість інформаційно-технічної системи, час виявлення інциденту, можливість відновлення), оскільки кіберінциденти впливають як на доступність, так і на цілісність та конфіденційність енергосервісів[5, 13].

Як відзначають автори [23, 24] перевагами застосування кваліметричного підходу для енергетичних систем є його придатність для оцінювання багатопарметричних об'єктів, можливості швидкого ранжування, прозорість для прийняття управлінських рішень, гнучкість відносно додавання нових показників та параметрів відповідно до модернізації систем та перерозподіл загроз і критеріїв оцінки. Разом з тим, кваліметричні підходи мають і ряд обмежень, що необхідно враховувати при їх застосуванні, як то відповідний професіоналізм та неупередженість експерттів, проблеми зі статистичною валідацією у разі відсутності великих наборів даних інцидентів, що характерно для великих енергетичних комплексів, як атомні станції, необхідність інтеграції з кількісними моделями для оцінки великих технічних ризиків (наприклад, вибухів, пожеж, механічних відмов, тощо).

Аналіз літератури [25-28] показує ключові прогалини в сучасних наукових алгоритмах оцінювання ризиків, особливо для українських енергосистем, а саме потреба в стандартизованих наборах кіберіндикаторів для енергосектора, розрбки методів об'єктивізації експертних ваг (наприклад, через агрегування даних про інциденти або машинне навчання), інтеграція кваліметрії з реальним time-series моніторингом та сценарним аналізом стійкості, розробка підходів валідації кваліметричних моделей на основі історичних кейсів і симуляцій.

Кваліметричні методи є практичним інструментом для оцінювання ризиків у енергетиці, особливо коли потрібно швидко ранжувати багато різнорідних загроз та врахувати якісні фактори (включно з кібербезпекою). Однак для підвищення надійності результатів їх потрібно комбінувати з кількісними методами, удосконалювати процедури отримання й перевірки експертних ваг та використовувати можливості IT (аналітика великих даних, ML) для зниження суб'єктивності та підвищення адаптивності моделей.

Також, слід зазначити, що у сфері управління ризиками та кібербезпеки для енергетичних підприємств ключове значення мають міжнародні стандарти, які задають методологічні основи та практичні інструменти оцінювання. Так, ISO 31000 "Risk Management – Guidelines" [29] визначає загальні принципи, структуру та процеси управління ризиками та забезпечує універсальну методологічну основу, яка дозволяє адаптувати управління ризиками до специфіки енергетичних підприємств. Важливо зазначити, що ISO 31000 орієнтований на системний підхід і передбачає ідентифікацію, аналіз, оцінювання та обробку ризиків з урахуванням як технічних, так і організаційних факторів. У контексті кваліметрії цей стандарт формує основу для розробки кількісних та якісних критеріїв оцінювання ризиків. В свою чергу, ISO/IEC 27001 "Information Security Management Systems" [30] є провідним стандартом у сфері інформаційної безпеки, що регламентує створення, впровадження та підтримку систем управління інформаційною безпекою (СУІБ). Для енергетичних підприємств цей стандарт особливо актуальний через зростання рівня цифровізації, підключення до "розумних мереж" (smart grids) та використання

SCADA-систем. Інтеграція положень ISO/IEC 27001 дозволяє врахувати аспекти кіберзагроз у загальній системі управління ризиками та поєднати їх із кваліметричними методами оцінювання. NIST SP 800-82 “Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security” [31] надає рекомендації щодо захисту промислових систем управління, зокрема SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), DCS (Distributed Control System) та інших технологій, які широко застосовуються в енергетиці. На відміну від ISO-стандартів, документ NIST орієнтовний на практичні технічні заходи, що дозволяє деталізувати підхід до оцінювання ризиків кіберзагроз [32, 33]. Так, у [34] Національного інституту стандартів і технологій США (NIST) розроблено дорожню карту розвитку кібербезпеки для критичної інфраструктури та виділено напрями, що потребують пріоритетної уваги: автентифікація, автоматизований обмін індикаторами загроз, оцінка відповідності, підготовка кадрів, аналіз даних, управління ланцюгами постачання, міжнародна співпраця та стандарти у сфері конфіденційності. Дорожня карта стала основою для формування підходів до гармонізації кіберзахисту в промислових та енергетичних системах.

Table 1

Comparison of international regulatory documents on risk management and cybersecurity in the energy sectorenergy sector

Таблиця 1

Порівняння міжнародних нормативних документів з управління ризиками та кібербезпеки в енергетиці

Нормативний документ	Основна сфера застосування	Ключові положення	Релевантність для енергопідприємств
ISO 31000 “Risk Management – Guidelines”	Управління ризиками (усі сфери діяльності)	- Принципи, структура та процес управління ризиками - Інтеграція в систему корпоративного управління - Баланс якісних та кількісних методів	Забезпечує методологічну основу для оцінювання ризиків технічних процесів, управління інфраструктурою та прийняття рішень у сфері енергетики
ISO/IEC 27001 “Information Security Management Systems”	Управління інформаційною безпекою	- Побудова системи управління інформаційною безпекою (СУІБ) - Ідентифікація, аналіз та мінімізація кіберризиків - Контроль доступу, моніторинг та інцидент-менеджмент	Дозволяє захистити дані, мережеву інфраструктуру та SCADA-системи енергопідприємств від кіберзагроз
NIST SP 800-82 “Guide to ICS Security”	Кібербезпека промислових систем управління (ICS, SCADA, DCS)	- Практичні заходи кіберзахисту - Моделі загроз для ICS - Інструменти моніторингу та реагування	Орієнтований на специфіку промислових систем, критично важливих для енергетики; дає практичні рекомендації з технічного захисту
NIST «Roadmap for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity»	Розвиток кібербезпеки для критичної інфраструктури	- Автентифікація та аналіз даних - Автоматизований обмін індикаторами загроз - Оцінка відповідності - Підготовка кадрів - Управління ланцюгами постачання - Розробка стандартів у сфері конфіденційності	Орієнтований на забезпечення кіберзахисту в промислових та енергетичних системах

Використання рекомендацій NIST у поєднанні з ISO 31000 та ISO/IEC 27001 створює комплексну основу для інтегрованої системи управління ризиками та забезпечує методологічну та практичну базу для розробки удосконалених кваліметричних підходів. Вони дозволяють гармонізувати кількісні та якісні методи оцінювання ризиків, враховуючи не лише технічні параметри обладнання, але й інформаційно-кібернетичні аспекти, що дедалі більше впливають на безпеку функціонування енергопідприємств (табл. 1).

В Європейському просторі, питання забезпечення кібербезпеки також мають важливе значення і активно обговорюються Європейською комісією (ЄК) з метою забезпечення захисту критичної інфраструктури. Так, ЄК запропонувала комплексну програму для посилення захисту критичної інфраструктури (CIP) у державах-членах ЄС, у звязку з цим розробила відповідний документ [35], який визначає основні принципи управління ризиками, пов'язаними з фізичними та кіберзагрозами, та окреслює рамки співпраці між країнами ЄС. Основний акцент робиться на ідентифікації об'єктів критичної інфраструктури, створенні єдиного механізму оцінювання загроз і запровадженні підходів до превентивного управління ризиками. У 2015 році Європейська Комісія запропонувала концепцію «Енергетичного союзу», спрямованого на підвищення стійкості енергетичної системи ЄС, зменшення залежності від зовнішніх постачальників енергоресурсів і адаптацію до викликів зміни клімату [36], що зумовлює необхідність інтеграції внутрішнього енергетичного ринку, інвестування у відновлювану енергетику та підвищення рівня енергетичної безпеки за допомогою диверсифікації джерел постачання та цифровізації енергосистем з акцентом на кіберзахисті енергетичної інфраструктури.

Розглянуті нормативні документи демонструють еволюцію міжнародних підходів до управління ризиками та захисту критичної інфраструктури, що включає як загальну методологію і системний підхід, які запропоновані в міжнародних стандартах ISO до конкретних технічних та організаційних кроків з розвитку кіберзахисту, як в стандартах NIST. Європейська Комісія, у свою чергу, зосереджується на інтеграції політик безпеки та енергетики в рамках ЄС, але спільною рисою на всіх рівнях є акцент на системному управлінні ризиками, посиленні кібербезпеки та розвитку міжнародної співпраці для забезпечення стійкості енергетичних та інфраструктурних систем.

Виклад основного матеріалу

Кваліметрія як наука про кількісне оцінювання якості базується на ідеї об'єктивного відображення властивостей об'єкта через систему вимірюваних показників. У контексті управління ризиками цей підхід дозволяє перейти від якісних суджень до кількісних оцінок, що підвищує точність прийняття управлінських рішень. Основними принципами є: системність (урахування всіх аспектів ризику), комплексність (охоплення технічних, організаційних та соціальних чинників), порівнюваність (можливість співставлення результатів різних об'єктів або процесів), а також адекватність (відповідність оцінки реальним умовам функціонування системи).

Ефективність кваліметричного аналізу значною мірою залежить від правильності добору показників, які відображають сутність ризиків та відповідають вимогам повноти, вимірюваності, не залежності та значущості [37]. Для оцінювання ризиків у виробничих та технічних системах використовуються як кількісні показники (ймовірність відмов, інтенсивність відмов, фінансові втрати), так і якісні характеристики (рівень підготовки персоналу, відповідність нормативним вимогам). Застосування багаторівневих ієрархій критеріїв дозволяє структурувати ризики за сферами прояву: технічні, організаційні, інформаційні, екологічні тощо [38, 39]. Разом з тим, однією з ключових задач кваліметрії є визначення відносної значущості (ваги) кожного показника у загальній структурі ризику. Для цього застосовуються методи експертних оцінок (метод парних порівнянь, аналіз ієрархій Сааті), статистичні методи або комбіновані підходи. Побудова інтегрального показника ризику забезпечує можливість комплексної оцінки складних систем і спрощує процес прийняття рішень на основі узагальненого рівня ризику, що дозволяє порівнювати різні об'єкти чи сценарії за єдиною шкалою [40, 41].

Особливістю сучасних ризиків в системі енергетичного менеджменту є їх багатофакторний характер, що вимагає застосування методів математичного та статистичного аналізу. До найбільш поширених належать регресійний аналіз, факторний та кластерний аналіз, метод головних компонент, використання яких дозволяє виявити приховані залежності між показниками, визначити найбільш критичні фактори впливу та прогнозувати поведінку системи в умовах невизначеності.

Сучасні умови цифровізації виробничих і управлінських процесів призвели до появи нового класу ризиків, пов'язаних із кіберзагрозами. Традиційні кваліметричні методики, орієнтовані переважно на технікні та організаційні фактори, потребують удосконалення для адекватного врахування специфіки інформаційної безпеки, що можливо при врахуванні показників оцінювання ризиків що зумовлені кіберзагрозам, розробки специфічних критеріїв оцінки, використання динамічних показників та інтеграції цих підходів в існуючи системи. Для реалізації такого підходу необхідно до традиційних параметрів ризику додати нові, пов'язані з цифровою інфраструктурою: рівень захищеності інформаційних систем, кількість та критичність уразливостей, ефективність засобів аутентифікації, здатність до відновлення після кіберінцидентів, що забезпечить комплексний погляд на ризик, який охоплює як матеріальні, так і інформаційні активи.

У сфері кібербезпеки значну роль відіграє своєчасність виявлення та нейтралізації загроз, стійкість до нових видів атак, рівень підготовки персоналу у сфері кіберзахисту. Відповідно, у кваліметричні моделі слід інтегрувати критерії швидкодії, адаптивності та відповідності міжнародним стандартам кібербезпеки (ISO/IEC 27001, NIST тощо). А оскільки спектр кіберзагроз постійно змінюється, значущість окремих факторів ризику також варіює, що потребує застосування методів машинного навчання та багатофакторного аналізу для автоматиного коригування ваг показників залежно від актуальних умов. Крім того, перс пективним є інтегрування кваліметрії з системами моніторингу кіберзагроз, а саме використання даних із систем виявлення вторгнень, SIEM-платформ (Security Information and Event Management) та баз індикаторів компрометації дозволяє формувати актуалізовану оцінку ризику в режимі реального часу. Таким чином, квалітетричні моделі стають не лише інструментом аналітики, а й складовою системи оперативного управління інформаційною безпекою.

Для цього пропонується алгоритм оцінки ризиків з кіберкомпонентом для енергетичного підприємства, який складається з наступних етапів (рис.1):

Етап 1. Визначення об'єкту аналізу та ідентифікація активів. На цьому етапі проводиться аналіз енергетичного підприємства, його структура, компоненти енергетичної системи, процеси, як виконавчі, так і забезпечуючі, визначаються інформаційні системи, бази даних, канали комунікації та критичні цифрові ресурси, що підлягають захисту.

Етап 2. Ідентифікація загроз енергопідприємства. На цьому етапі паралельно з Етапом 1 формується перелік потенційних загроз з урахуванням можливих кіберзагроз - від технічних збоїв та шкідливого програмного забезпечення до фішингових атак і витоку конфіденційних даних. Слід зауважити, чим повніший буде перелік можливих загроз, як внутрішніх, так і зовнішніх, тим якісніше буде аналіз, разом з тим необхідно враховувати взаємозв'язок зовнішніх факторів на внутрішні процеси енергетичної системи.

Етап 3. Формування системи показників ризику. Для кожної загрози визначаються параметри оцінки: імовірність виникнення, масштаб можливих наслідків, час відновлення після інциденту, рівень готовності системи до протидії атакам.

Етап 4. Побудова вагових коефіцієнтів. Важливість кожного показника визначається експертним шляхом або за допомогою статистичних методів. Для кіберкомпонентів застосовується адаптивна модель ваг, яка змінюється залежно від актуальної загрозової ситуації (наприклад, зростання ваги факторів «фішингові атаки» чи «використання вразливостей нульового дня»). При реалізації цього етапу необхідно врахувати кіберкомпоненту і її вплив на інші можливі загрози, ймовірності їх настання в результаті кіберзагрози та відповідні наслідки, тобто , наприклад, вплив кібератак на технічні системи енергооб'єкту, на можливості реагування персоналу (професійність та кваліфікація) у разі порушення роботи систем моніторингу, тощо.

Етап 5. Обчислення інтегрального показника ризику. На основі кваліметричної моделі формується узагальнена оцінка, яка враховує як технічні, так і інформаційні параметри. Інтегральний показник дозволяє класифікувати ризики за рівнями: низький, середній, високий, критичний.

Етап 6. Моделювання сценаріїв впливу кіберзагроз. Використання методів багатофакторного аналізу та імітаційного моделювання дозволяє прогнозувати наслідки атак різного масштабу та визначати оптимальні стратегії реагування.

Етап 7. Формування рекомендацій та управлінських рішень. На основі інтегральних оцінок і змодельованих сценаріїв визначаються пріоритети захисних заходів, потреби у додатковому фінансуванні кіберзахисту, а також розробляються процедури швидкого реагування на інциденти.

Таким чином, запропонований алгоритм інтегрує кваліметричні підходи з методами кіберризик-менеджменту, що дозволяє створити динамічну систему оцінювання та підвищити рівень стійкості організації до кіберзагроз.

Важливим етапом формування ефективної оцінки ризиків є визначення вагових коефіцієнтів для кожного виду загроз. У традиційних кваліметричних моделях вагові коефіцієнти формуються на основі експертних оцінок, статистичних даних та аналізу ймовірності реалізації ризиків, а моделі ризик-менеджменту передбачають розрахунок інтегрального показника ризику на основі набору вагових коефіцієнтів, що відображають відносну значущість різних факторів. Проте з огляду на зростання кіберзагроз, доцільно враховувати додатковий набір показників, пов'язаних із захищеністю інформаційно-комунікаційних систем енергопідприємства, які здатні істотно впливати на функціонування критичної інфраструктури. Така модифікація дозволяє інтегрувати цифрові ризики у загальну модель оцінювання. Для інтеграції кіберризиків до системи оцінювання пропонується модифікація вагових коефіцієнтів шляхом введення додаткового коефіцієнта кіберкомпонента (W_C), який враховує рівень уразливості інформаційних систем підприємства, а також потенційний вплив атак на технологічні процеси. Наприклад, для SCADA-систем коефіцієнт може мати вищу вагу, ніж для офісної IT-інфраструктури. Ваги можуть змінюватися залежно від: поточного рівня кіберзагроз (визначається з використанням NIST Cybersecurity Framework або ISO/IEC 27005); наявності виявлених інцидентів; ступеня критичності енергетичного об'єкта.

Формула інтегральної ваги з кіберфактором для енергетичного підприємства буде мати вигляд:

$$W_i' = W_i(1 + \alpha C_r), \quad (1)$$

де W_i'– модифікований ваговий коефіцієнт показника, W_i – початкова вага без урахування кіберфактора, C_r – коефіцієнт кіберризику (0…1), α – коефіцієнт чутливості моделі до кіберзагроз.

Інтегральний показник з урахуванням кіберфактору дозволяє точніше врахувати взаємодію технічних, організаційних, екологічних, економічних та інших факторів, підвищити об'єктивність інтегральної оцінки безпеки підприємства, порівнювати підприємства між собою, визначати динаміку зміни рівня безпеки та прогнозувати вплив кіберзагроз на критичні процеси, даючи змогу формувати більш збалансовану систему пріоритетів у управлінні ризиками.

Розглянемо застосування запропонованої моделі для атомних електростанцій на основі модифікація вагових коефіцієнтів із урахуванням кіберризиків, що дозволяє більш адекватно відображати реальну картину безпеки об'єкта критичної інфраструктури, яким є атомна електростанція. У класичних підходах оцінка ризиків для АЕС традиційно концентрувалася на фізичних загрозах: технічних відмовах, помилках персоналу, природних катастрофах, порушеннях систем охолодження чи енергопостачання. Проте в умовах цифровізації технологічних процесів, активного використання SCADA-систем, інтелектуальних датчиків та автоматизованих систем керування, зростає вплив кіберфакторів. Виокремо основні загрози і їх вагові показники для АЕС (табл. 2) для наочності відображення запропонованої моделі.

Для кожної загрози визначається коефіцієнт кіберризику C_r (0 – відсутній, 1 – максимальний) і виконується модифікація ваг за формулою (1), де чутливість моделі α=0,5 (табл. 3).

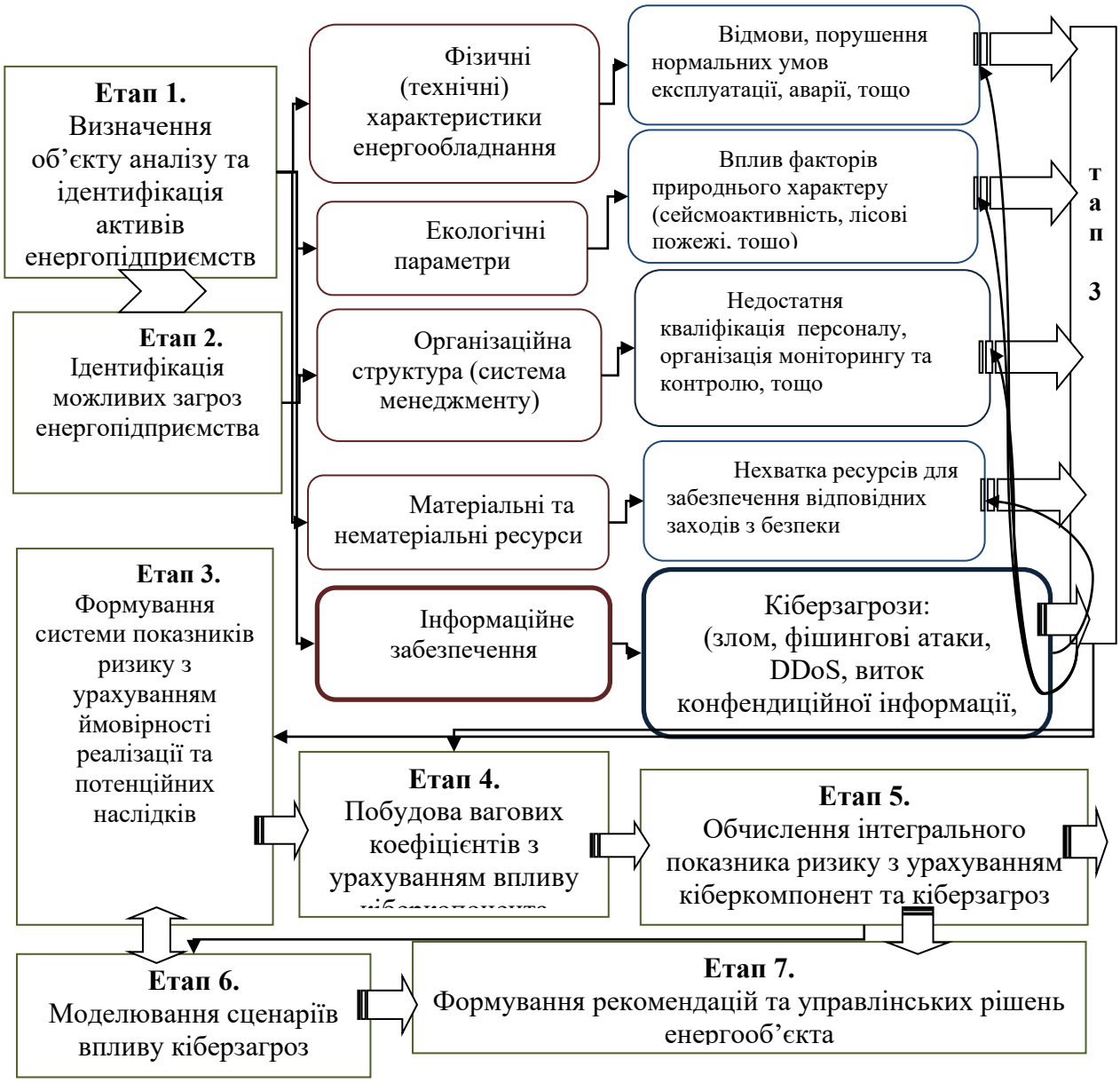

Рис. 1– Схема-алгоритм оцінки ризиків з кіберкомпонентом для енергопідприємства
Fig. 1 – Risk assessment algorithm with a cyber component for an energy enterprise

Table 2
Basic threats to a nuclear power plant (without cyber component)
Таблиця 2
Базові загрози для атомної електростанції (без кіберкомпонента)

№	Загроза	Початковий ваговий коефіцієнт W_i
1	Відмова основного технологічного обладнання (реактор, турбіна, насоси)	0,30
2	Помилка персоналу при управлінні технологічними процесами	0,20
3	Зовнішні природні фактори (землетруси, повені, екстремальні температури)	0,15
4	Відмова систем охолодження	0,20
5	Порушення електропостачання ззовні	0,15
	Сума ваг: **1,00** (нормована)	

Table 3

Modified weighting factor taking into account the cyber component for a nuclear power plant

Таблиця 3

Модифікований ваговий коефіцієнт з урахуванням кіберкомпонента для атомної електростанції

№	Загроза	Початковий ваговий коефіцієнт W_i	Коефіцієнт кіберризику C_r	Модифікований ваговий коефіцієнт W_i'
1	Відмова основного технологічного обладнання (реактор, турбіна, насоси)	0,30	0,6 (кібератака може вплинути на системи контролю)	0,39
2	Помилка персоналу при управлінні технологічними процесами	0,20	0,4 (соціальна інженерія, фішинг)	0,24
3	Зовнішні природні фактори (землетруси, повені, екстремальні температури)	0,15	0 (кіберзагрози не впливають)	0,15
4	Відмова систем охолодження	0,20	0,8 (маніпуляції з датчиками, SCADA)	0,28
5	Порушення електропостачання ззовні	0,15	0,5 (кібератаки на енергомережу)	0,19

З отриманих даних розрахунку модіфікованого вагового коефіцієнту видно, що зросла важливість технічних і організаційних ризиків, що мають кіберкомпонент (системи охолодження, технологічне обладнання); природні фактори залишилися без змін, оскільки кіберзагрози їх не посилюють, а ризик людського фактору підвищився через вплив кіберсоціальних атак. При цьому інтегральний розрахунок ризику для АЕС показав, інтегральний індекс без кіберкомпонента дорівнює 10,65, а інтегральний індекс з кіберкомпонентом - 13.57, що свідчить про приріст: +27.4%.

Для візуалізації отриманих даних і оцінювання загального рівня з метою визначення прийнятності ризику та розробки рекомендацій для подальшого управління енергопідприємством використовують матриці ризику. Класичні матриці ризику ґрунтуються на комбінації ймовірності події та ступеня її наслідків. Додавання кіберкомпонента передбачає включення третього виміру – інформаційного впливу (наприлад, вплив на доступність, цілісність та конфіденційність даних) (табл. 4). Це дозволяє отримати багатовимірні матриці - 3D-матриці ризиків, де на осях відображаються ймовірність, наслідки та кіберфактор (рис. 2), де чим вище ризик, тим ближче колір точки до червоного, а при низькому ризику - зелений. Таке представлення допомагає керівникам енергопідприємств швидко ідентифікувати найбільш критичні ризики, у яких кіберфактор суттєво посилює загрозу.

Запропонована методика оцінювання рівня ризиків, що поєднує кваліметричні підходи з урахуванням кіберзагроз, має низку переваг, а її застосування дозволяє отримати більш комплексну картину безпеки підприємства, оскільки в аналіз інтегруються технічні, організаційні та кіберфактори. Гнучкість системи вагових коефіцієнтів забезпечує можливість адаптації моделі до динамічних змін середовища та появи нових типів загроз. Важливим результатом є можливість візуалізації оцінок у вигляді багатовимірних матриць ризиків, що істотно спрощує процес прийняття управлінських рішень і підвищує точність прогнозування. Разом з тим методика має певні обмеження, які необхідно враховувати при практичному застосуванні. Насамперед результати значною мірою залежать від якості вихідних даних: достовірності статистики інцидентів, повноти інформації щодо кіберзагроз та коректності формування показників. Для забезпечення об’єктивності оцінок виникає потреба у залученні експертів для встановлення та коригування вагових коефіцієнтів, що може зумовлювати певну суб’єктивність та потребує підготовку вимог та критеріїв професійних та етичних якостей, які висуваються до експертів. Додатковим викликом є масштабування методики для великих підприємств із різнорідними технологічними процесами, що ускладнює її практичне використання без попередньої адаптації, що особливо важливо для об’єктів підвищеної небезпеки, критичної інфраструктури, тощо.

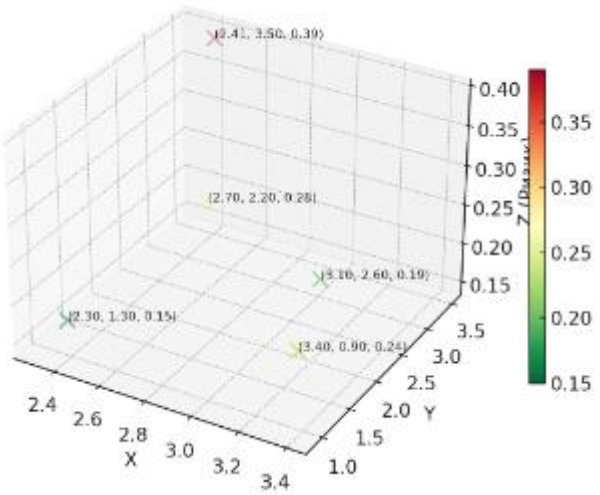

Рис. 2– Візуалізація 3D-матриці ризиків для базових загроз АЕС з урахуванням часу виявлення загрози *D*: X – ймовірність події (*P*); Y – вплив/наслідки небажаної події (*I*); Z – кіберкомпонент (*C*)

Fig. 2 – Visualization of the 3D risk matrix for basic NPP threats taking into account the threat detection time D: X – probability of an event (P); Y – impact/consequences of an undesirable event (I); Z – cyber component (C)

Table 4

Table of indicators with weights for the occurrence of an undesirable event (threat) at an energy enterprise

Таблиця 4

Таблиця показників з вагами настання небажаної події (загроз) на енергетичному підприємстві

Показник оцінки ризику	Опис	Одиниці вимірювання	Вага (*W*)
P – Ймовірність настання небажаної події	Частота виникнення події	бал (1–5)	0,3
I – Вплив, наслідки	Рівень шкоди (фінансової, репутаційної)	бал (1–5)	0,4
C – Кіберкомпонент	Уразливість до кіберзагроз	бал (1–5)	0,2
D – Час виявлення	Швидкість виявлення інциденту	години/дні	0,1

Висновки

Сучасний розвиток інформаційних технологій дає можливості для розвитку та автоматизації складних систем та інфраструктур, та разом з тим постають питання та виклики щодо забезпечення безпеки з урахуванням можливих загроз небажаного втручання в роботу автоматизованих інформаційних систем, що необхідно враховувати при розробки стратегії управління підприємствами. Проведене дослідження дозволило сформувати науково обґрунтовану методику оцінювання рівня безпеки підприємства з урахуванням кіберзагроз, яка поєднує кваліметричні підходи та модифіковану систему вагових коефіцієнтів. У результаті було отримано інтегральну модель оцінювання ризиків, що забезпечує більш повне уявлення про стан захищеності об’єкта та дозволяє виявляти критичні вразливості ще на етапі планування заходів безпеки, або ж при прийнятті рішень в процесі функціонування. Практичне значення роботи полягає у можливості адаптації методики до специфіки атомно-енергетичного комплексу, де поєднання традиційних техногенних загроз і сучасних кіберризиків формує особливо високий рівень потенційної небезпеки. Так, в роботі розглянуто базові загрози для атомної електростанції, що дало можливість: виділити приховані уразливості – наприклад, відмова систем охолодження може бути не лише наслідком фізичної несправності, а й результатом маніпуляції програмним забезпеченням чи викривлення даних від датчиків, що було враховано при

оцінки ризику. Таким чином, застосування моделі демонструє, що реальна картина ризиків АЕС значною мірою змінюється за рахунок кіберкомпонента. У порівнянні з класичними оцінками, інтегральний рівень ризику підвищується на 10–25 %, що свідчить про необхідність системної інтеграції заходів кіберзахисту в загальну політику безпеки атомної енергетики.

Подальшим напрямом розвитку дослідження є застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації оброблення великих масивів даних і побудови адаптивних систем управління ризиками. Використання алгоритмів машинного навчання дозволить не лише підвищити точність інтегральних оцінок, але й реалізувати прогнозування появи нових кіберзагроз, що наразі є одним із ключових викликів для систем критичної інфраструктури. Очікується, що розвиток цих підходів сприятиме створенню інтелектуальних систем моніторингу, які забезпечать проактивне реагування на ризики та підвищать стійкість підприємств у динамічному середовищі сучасних загроз

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. Khimicheva H. Mathematical model of an educational program quality assessment / H. Khimicheva, A. Volivach // Proceedings of National Aviation University. – 2020. – № *84*(3). – Pp. 71–79. DOI: https://doi.org/10.18372/2306-1472.84.14956
2. Грінченко Г. С., Мацько А. М. Інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології освіти. Машнобудування. 2024. Вип. 34 С. 39-50. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-04
3. Кучерук В. Ю. Покращення якості рекомендаційних систем на основі кваліметричних методів вимірювання / В. Ю. Кучерук, М. В. Глушко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2022. – № *2*. – С. 65–72. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-9
4. Біловодська О. Кваліметричний підхід оцінювання стратегічної діяльності управління дистрибуцією інноваційних продуктів у маркетинговій логістиці / О. Біловодська // Економічний часопис Волинського національного університету імені Лесі Українки. – 2021. – № 1*(*25). – С. 175–183. DOI: https://doi.org/10.29038/2786-4618-2021-01-175-183
5. Qualimetric method of assessing risks of low quality products / Trishch R., Nechuiviter O., Dyadyura K., Vasilevskyi O., Tsykhanovska I., Yakovlev M. // MM Science Journal. – 2021. – № 10. – Pp. 4769–4774. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021030
6. Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods / Trishch R., Cherniak O., Zdenek D., Petraskevicius V. // Engineering Management in Production and Services. – 2024. – № 16(2). – Pp. 118–127. DOI: https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017
7. Assessment of safety risks using qualimetric methods / Trishch R., Nechuiviter O., Hrinchenko H., Bubela T., Riabchykov M., Pandova I. // MM Science Journal. – 2023. – № 10. – P. 6668. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_10_2023021
8. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств / Грінченко Г. С., Кіпоренко О. В., Негодов С. С., Лисенко А. Я., Мазорчук К. К., Нос Р. С. // Машинобудування: зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2024. – Вип. 34. – С. 17–30. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02
9. Peček B. Methodology of monitoring key risk indicators / Peček, B., & Kovačič, A. (2019).. Economic Research-Ekonomska Istraživanja. – 2019. – № *32*(1). – С. 3485–3501. DOI: https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529
10. Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів / П. Ф. Буданов та інші // Машинобудування: зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, – 2022. – Вип. 30. – С. 73–84. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-73-84
11. Сороколат Н. А. Застосування функції помилок для оцінювання якості об’єктів кваліметрії / Н. А. Сороколат, Л. Ю. Фатєєва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2022. – № *4*(14). – С. 53–58. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.04.08

12. Ginevičius R. Quantitative assessment of quality management systems' processes / Ginevičius R., Trishch H., Petraškevičius V. // Economic Research-Ekonomska Istraživanja. – 2015. – № *28*(1). – Pp. 1096–1110. DOI: https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1087676
13. Risk assessment essentials guide for state energy security plans. Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response. – 2024/ – Access mode: https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/DOE%20CESER-Risk%20Assessment%20Essentials%20Guide%20for%20State%20Energy%20Security%20Plans.pdf (Last accessed October 28, 2025)
14. Quantitative and qualitative risk-informed energy investment for industrial companies / Urbano E. M., Martinez-Viol V., Kampouropoulos K., Romeral L. // Energy Reports. – 2023. – no 9. – Pp. 3290–3304. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.131
15. Assessing qualitative and quantitative dimensions of uncertainty in energy modelling for policy support in the United Kingdom / Pye, S., Li, F. G. N., Petersen, A., Broad, O., McDowall, W., Price, J., Usher, W. // Energy Research & Social Science. – 2018. – № 46. – Pp. 332–344. DOI: https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.028
16. Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach / Solangi, Y. A., Tan, Q., Mirjat, N. H., Ali, S. // Journal of Cleaner Production. – 2019. – № 236. – 117655. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117655
17. The role of data analytics within operational risk management: A systematic review from the financial services and energy sectors / Cornwell, N., Bilson, C., Gepp, A., Stern, S., Vanstone, B. J. // Journal of the Operational Research Society. – 2022. – № 74*(1)*. – Pp. 374–402. DOI: https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2041373
18. Gorzeń-Mitka I. Mapping the energy sector from a risk management research perspective: A bibliometric and scientific approach / I. Gorzeń-Mitka, M. Wieczorek-Kosmala // Energies. – 2023. – № 16*(4)*. DOI: https://doi.org/10.3390/en16042024
19. Creamer G. G. Volatility and risk in the energy market: A trade network approach / G. G. Creamer, T. Ben-Zvi // Sustainability. – 2021. – № 13*(*18). – 10199. DOI: https://doi.org/10.3390/su131810199
20. Kaka S. A comprehensive analysis of factors influencing biogas plant location / Kaka S., Memon M., Mari S. // Proceedings of the 9th North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management. – 2024. – DOI: https://doi.org/10.46254/NA09.20240143
21. Irfan M. Consumers' intention-based influence factors of renewable energy adoption in Pakistan: A structural equation modeling approach / Irfan M., Zhao Z. Y., Rehman A. // Environmental Science and Pollution Research. – 2021. – № 28. – Pp. 432–445. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-020-10504-w
22. Research on TBM parameter optimization based on failure probability / Zhang Q., Nie Y., Zhao W., Du L. // Engineering Failure Analysis. – 2025. – № *167*(B). – 109036. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109036
23. Ikwan F. Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis / F. Ikwan, D. Sanders, M. Hassan // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2021. – № *73*. – 104597. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104597
24. Proactive approaches of dynamic risk assessment based on indicators / Paltrinieri N., Landucci G., Nelson W. R., Hauge S. // Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry / eds. N. Paltrinieri, F. Khan. – Butterworth-Heinemann, 2016. – Pp. 63-73. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803765-2.00006-8
25. Gorzeń-Mitka I. Mapping the energy sector from a risk management research perspective: A bibliometric and scientific approach / I. Gorzeń-Mitka, M. Wieczorek-Kosmala // Energies. – 2024. – № *16*(4). DOI: https://doi.org/10.3390/en16042024
26. Zhu X. Application of multiple criteria decision making methods in construction: A systematic literature review / Zhu X., Meng X., Zhang M. // Journal of Civil Engineering and Management. – 2021. – № 27*(*6). Pp. 372–403. DOI: https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15260
27. A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges / Haes Alhelou H., Hamedani-Golshan M. E., Njenda T. C., Siano P. // Energies. – 2019. – № 12(4). – Pp. 682. DOI: https://doi.org/10.3390/en12040682
28. Le Coq C. Measuring the security of external energy supply in the European Union / C. Le Coq, H. Paltseva // Energy Policy. – 2009. – № 37*(*11). – Pp. 4474–4481. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.069
29. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines : (2nd ed.) / International Organization for Standardization. – Access mode : https://www.iso.org/standard/31000 (Last accessed October 28, 2025)

30. ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements : (3rd ed.) / International Organization for Standardization. – 2022. – Access mode : https://www.iso.org/standard/27001 (Last accessed October 28, 2025)

31. Guide to industrial control systems (ICS) security / Stouffer K., Lightman S., Pillitteri V., Abrams M., Hahn A. // (NIST Special Publication 800-82 Rev. 2) / National Institute of Standards and Technology. – 2015. DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r2
32. Hussain M. A. A survey on malware attacks in industrial air-gap systems / Hussain M. A., Samrouth K., Bakir N. // International Journal of Information Security. – 2025. – № 24. – P. 146. DOI: https://doi.org/10.1007/s10207-025-01044-w
33. A dynamic spatiotemporal deep learning solution for cloud–edge collaborative industrial control system distributed denial of service attack detection / Cao Z., Liu B., Gao D., Zhou D., Han X., Cao J. // Electronics. – 2025. – № 14. – P. 1843. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14091843
34. NIST roadmap for improving critical infrastructure cybersecurity / National Institute of Standards and Technology. – 2014. – Access mode : http://www.nist.gov/cyberframework/upload/roadmap-021214.pdf (Last accessed October 28, 2025)
35. Communication from the Commission on a European Programme for Critical Infrastructure Protection (COM(2006) 786 final) / European Commission. – Brussels, 2006. – Access mode : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52006DC0786 (Last accessed October 28, 2025)
36. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank: A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy (COM(2015) 80 final) / European Commission. – Brussels, 2015. – Access mode : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0080 (Last accessed October 28, 2025)
37. Torregosa, R. F., & Hu, W. (2013). Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 36,* 1092–1101. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.12103
38. A simheuristic for project portfolio optimization combining individual project risk, scheduling effects, interruptions, and project risk correlations / Saiz M., Calvet L., Juan A. A., Lopez-Lopez D. // Computers & Industrial Engineering. – 2024. – № 198. – 110694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110694
39. Chu C. Dynamic fault tree generation and quantitative analysis of system reliability for embedded systems based on SysML models / Chu C., Yang W., Chen Y. // Sensors. – 2024. – № 24. – P. 6021. DOI: https://doi.org/10.3390/s24186021
40. Markulik Š. Use of risk management to support business sustainability in the automotive industry / Markulik Š., Šolc M., Blaško P. // Sustainability. – 2024. – № 16. – P. 4308. DOI: https://doi.org/10.3390/su16104308
41. Karanikas N. Redefining health, risk, and safety for occupational settings: A mixed-methods study / N. Karanikas, H. Zerguine // Safety Science. – 2025. – № 181. – 106698. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106698

Отримано: 22.09.2025 Прийнято: 28.10.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]LYSENKO A.,
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]NOS R.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: nosruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5391-7703
[1]MAZORCHUK K.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ekaterina.mazorchuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0769-4872
[1]NEHODOV S.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: titansv2017@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3561-6924
[1]V. N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

IMPROVING QUALIMETRIC APPROACHES TO RISK ASSESSMENT OF ENERGY COMPANIES TAKING INTO ACCOUNT CYBERSECURITY ASPECTS

The article considers the possibility of applying qualimetric approaches to risk assessment, taking into account modern aspects of cyber threats arising in energy enterprises. For the purpose of risk assessment and management, the scientific, technical and regulatory framework was analysed and an algorithmic scheme was proposed that takes into account the cyber component, which is both a separate threat to the functioning of an energy enterprise and can influence other threats of various nature, and as a result increase the overall risk level. In the course of the study, a scientifically based methodology for assessing the level of enterprise security, taking into account cyber threats, was developed. The proposed approach combines qualimetric methods and a modified system of weighting coefficients, which made it possible to form an integrated risk analysis model that provides a more comprehensive view of the state of security of the and enables the timely detection of critical vulnerabilities both at the stage of planning security measures and during the adoption of management decisions in the course of operations. The study analysed the basic threats to a nuclear power plant, which made it possible to identify hidden threats, namely, it was established that the failure of cooling systems can be caused not only by physical malfunctions, but also by deliberate interference with software or distortion of sensor signals, which is taken into account when assessing risks. The paper presents a visualisation of risk assessment in the form of a 3D risk matrix with a cyber component, which provides a better understanding and helps energy company managers quickly identify the most critical risks in which the cyber factor significantly increases the threat. The application of the integrated model has shown that the actual level of risk at a nuclear power plant increases significantly due to the cyber component. Compared to the baseline assessment, the integrated risk indicator, taking into account the cyber component, increases by 10–25%, confirming the need for the systematic inclusion of cyber protection measures in the overall nuclear energy security policy.

KEYWORDS: risk, qualimetric approach, energy companies, cyber threats, assessment, risk matrices

In cites: Lysenko A., Nos R., Mazorchuk K., Nehodov S. (2025), Improving qualimetric approaches to risk assessment of energy companies taking into account cybersecurity aspects. *Engineering, (36),* 102-118. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-10 (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. Khimicheva, H & Volivach, A 2020, 'Mathematical model of an educational program quality assessment', *Proceedings of National Aviation University, 84*(3), Pp. 71–79. DOI: https://doi.org/10.18372/2306-1472.84.14956

2. Hrinchenko, H. S. & Matsko, A. M. (2024). Integration of qualimetric approaches into modern educational information measurement technologies. Engineering, (34), 39-50. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-04 (in Ukraine)

3. Kucheruk, VYu & Hlushko, MV 2022, 'Improving the quality of recommender systems based on qualimetric measurement methods.', *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh,* no 2, Pp. 65–72, DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-9

4. Bilovodska, O 2021, 'Qualimetric approach to evaluating strategic activities of distribution management of innovative products in marketing logistics', *Ekonomichnyi chasopys Volynskoho natsionalnoho universytetu imeni Lesi Ukrainky*, no 1(25), Pp. 175–183, DOI: https://doi.org/10.29038/2786-4618-2021-01-175-183

5. Trishch, R, Nechuiviter, O, Dyadyura, K, Vasilevskyi, O, Tsykhanovska, I & Yakovlev, M 2021, 'Qualimetric method of assessing risks of low quality products', *MM Science Journal,* no (10), Pp. 4769–4774, DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2021_10_2021030

6. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, 'Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods', *Engineering Management in Production and Services*, no 16*(*2), Pp. 118–127, DOI: https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017

7. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, 'Assessment of safety risks using qualimetric methods', *MM Science Journal,* no (10), P. 6668, DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_10_2023021

8. Hrinchenko, HS, Kiporenko, OV, Nehodov, SS, Lysenko, AYa, Mazorchuk, KK & Nos, RS 2024, 'Development of a regulatory approach to assessing the risks of energy enterprises', *Mashynobuduvannia*, Iss. 34, Pp. 17–30, DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02

9. Peček, B & Kovačič, A 2019, 'Methodology of monitoring key risk indicators', *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, no 32*(1*), Pp. 3485–3501, DOI: https://doi.org/10.1080/1331677X.2019.1658529

10. Budanov, PF, Hrinchenko, HS, Nechuiviter, OP, Boiko, TH & Tsykhanovska, IV 2022, 'Application of qualimetry methods to assess complex quality indicators of multiparametric lenses', *Mashynobuduvannia*, Iss. 30, Pp. 73–84, DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-73-84

11. Sorokolat, NA & Fatieieva, LYu 2022, 'Application of the error function to assess the quality of quality objects', *Visnyk NTU «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, no 4(14), Pp. 53–58. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.04.08

12. Ginevičius, R, Trishch, H & Petraškevičius, V 2015, 'Quantitative assessment of quality management systems' processes', *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, no 28(1), Pp. 1096–1110, DOI: https://doi.org/10.1080/1331677X.2015.1087676

13. U.S. Department of Energy 2024, *Risk assessment essentials guide for state energy security plans*. Office of Cybersecurity, Energy Security, and Emergency Response, viewed <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/DOE%20CESER-Risk%20Assessment%20Essentials%20Guide%20for%20State%20Energy%20Security%20Plans.pdf>

14. Urbano, EM, Martinez-Viol, V, Kampouropoulos, K & Romeral, L 2023, 'Quantitative and qualitative risk-informed energy investment for industrial companies', *Energy Reports*, no 9, Pp. 3290–3304, DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.131

15. Pye, S, Li, FGN, Petersen, A, Broad, O, McDowall, W, Price, J & Usher, W 2018, 'Assessing qualitative and quantitative dimensions of uncertainty in energy modelling for policy support in the United Kingdom', *Energy Research & Social Science,* no 46, Pp. 332–344, DOI: https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.07.028

16. Solangi, YA, Tan, Q, Mirjat, NH & Ali, S 2019, 'Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach', *Journal of Cleaner Production*, no 236*,* 117655, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117655

17. Cornwell, N, Bilson, C, Gepp, A, Stern, S & Vanstone, BJ 2022, 'The role of data analytics within operational risk management: A systematic review from the financial services and energy sectors', *Journal of the Operational Research Society*, no 74(1), Pp. 374–402, DOI: https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2041373
18. Gorzeń-Mitka, I & Wieczorek-Kosmala, M 2023, 'Mapping the energy sector from a risk management research perspective: A bibliometric and scientific approach', *Energies*, no 16*(4),* DOI: https://doi.org/10.3390/en16042024
19. Creamer, GG & Ben-Zvi, T 2021, 'Volatility and risk in the energy market: A trade network approach', *Sustainability*, no 13(18), 10199, DOI: https://doi.org/10.3390/su131810199
20. Kaka, S, Memon, M & Mari, S 2024, 'A comprehensive analysis of factors influencing biogas plant location', *Proceedings of the 9th North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management,* DOI: https://doi.org/10.46254/NA09.20240143
21. Irfan, M, Zhao, ZY & Rehman, A 2021, 'Consumers' intention-based influence factors of renewable energy adoption in Pakistan: A structural equation modeling approach', *Environmental Science and Pollution Research*, no 28*,* Pp. 432–445, DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-020-10504-w
22. Zhang, Q, Nie, Y, Zhao, W & Du, L 2025, 'Research on TBM parameter optimization based on failure probability', *Engineering Failure Analysis*, no 167*(*B), 109036, DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109036
23. Ikwan, F, Sanders, D & Hassan, M 2021, 'Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, no 73*,* 104597, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104597
24. Paltrinieri, N, Landucci, G, Nelson, WR & Hauge, S 2016, 'Proactive approaches of dynamic risk assessment based on indicators', In N. Paltrinieri & F. Khan (Eds.), *Dynamic risk analysis in the chemical and petroleum industry,* Butterworth-Heinemann, Pp. 63-73, DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803765-2.00006-8
25. Gorzeń-Mitka, I & Wieczorek-Kosmala, M 2023, 'Mapping the energy sector from a risk management research perspective: A bibliometric and scientific approach', *Energies*, no 16*(4*), DOI: https://doi.org/10.3390/en16042024
26. Zhu, X, Meng, X & Zhang, M 2021, 'Application of multiple criteria decision making methods in construction: A systematic literature review', *Journal of Civil Engineering and Management*, no 27*(6*), Pp. 372–403. DOI: https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15260
27. Haes Alhelou, H, Hamedani-Golshan, ME, Njenda, TC & Siano, P 2019, 'A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges', *Energies*, no 12*(4*), P. 682. DOI: https://doi.org/10.3390/en12040682
28. Le Coq, C & Paltseva, E 2009, 'Measuring the security of external energy supply in the European Union', *Energy Policy*, no 37(11), Pp. 4474–4481, DOI: https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.069
29. International Organization for Standardization 2018, *ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines* (2nd ed.), viewed <https://www.iso.org/standard/31000>
30. International Organization for Standardization 2022, *ISO/IEC 27001:2022 Information security, cybersecurity and privacy protection – Information security management systems – Requirements* (3rd ed.), viewed <https://www.iso.org/standard/27001>
31. Stouffer, K, Lightman, S, Pillitteri, V, Abrams, M & Hahn, A 2015, *Guide to industrial control systems (ICS) security* (NIST Special Publication 800-82 Rev. 2), DOI: https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-82r2
32. Hussain, MA, Samrouth, K & Bakir, N 2025, 'A survey on malware attacks in industrial air-gap systems', *International Journal of Information Security*, no 24, P. 146, DOI: https://doi.org/10.1007/s10207-025-01044-w
33. Cao, Z, Liu, B, Gao, D, Zhou, D, Han, X & Cao, J 2025, 'A dynamic spatiotemporal deep learning solution for cloud–edge collaborative industrial control system distributed denial of service attack detection', *Electronics,* no 14*,* P. 1843. DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14091843
34. National Institute of Standards and Technology 2014, *NIST roadmap for improving critical infrastructure cybersecurity,* viewed <http://www.nist.gov/cyberframework/upload/roadmap-021214.pdf>

35. European Commission 2006, *Communication from the Commission on a European Programme for Critical Infrastructure Protection* (COM(2006) 786 final), Brussels, viewed <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52006DC0786>
36. European Commission 2015, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee, the Committee of the Regions and the European Investment Bank: A framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy* (COM(2015) 80 final), Brussels, viewed <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0080>
37. Torregosa, RF & Hu, W 2013, 'Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes', *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,* no 36, Pp. 1092–1101. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.12103
38. Saiz, M, Calvet, L, Juan, A. A & Lopez-Lopez, D 2024, 'A simheuristic for project portfolio optimization combining individual project risk, scheduling effects, interruptions, and project risk correlations', *Computers & Industrial Engineering,* no 198, 110694. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110694
39. Chu, C, Yang, W & Chen, Y 2024, 'Dynamic fault tree generation and quantitative analysis of system reliability for embedded systems based on SysML models', *Sensors,* no 24, 6021. DOI: https://doi.org/10.3390/s24186021
40. Markulik, Š, Šolc, M & Blaško, P 2024, 'Use of risk management to support business sustainability in the automotive industry', *Sustainability,* no 16, 4308. DOI: https://doi.org/10.3390/su16104308
41. Karanikas, N & Zerguine, H 2025, 'Redefining health, risk, and safety for occupational settings: A mixed-methods study', *Safety Science,* no 181, 106698. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106698

Submission received: 09/22/2025 Accepted: 10/28/2025 Published: 12/30/2025

https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11
УДК 658.62.018.012

[1]О. О. ОВЧАРОВ,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0764-4063
[1]К. А. КОТЕЛЕВЕЦЬ,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kyrylo.ktl@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8811-8848
[1]Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНИХ ПІДХОДІВ ДО ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ АЕС

Анотація. У статті розглянуто проблему вдосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання атомних електростанцій, зокрема стрижнів обмотки статора турбогенераторів типу ТВВ-1000. Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення надійності та безпеки в умовах понадпроектної експлуатації енергоблоків та розробки відповідних нормативних програм для проведення технічної діагностики. В роботі на основі проведеного огляду сучасних міжнародних та вітчизняних стандартів та аналізу новітніх методів теплової та неінвазивної діагностики пропонується поетапна нормативна програма проведення діагностики витрат охолоджувальної води в системі охолодження стрижнів статора турбогенератора, яка базується на застосуванні ультразвукового витратоміра та алгоритмах теплотехнічного аналізу. Визначено критерії оцінки технічного стану стрижнів і запропоновано відповідні корегувальні дії при виявленні відхилень в період плново-попереджувальних робіт для енергоблоків атомних електростанцій. Отримані результати можуть бути інтегровані у PLiM-системи управління ресурсом турбогенераторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *турбогенератор, стрижні, тепловіддача, технічна діагностика, нормативні рекомендації.*

Як цитувати: Овчаров О. О., Котелевець К. А. Удосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання АЕС. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 119-128. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11

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

Забезпечення надійності та безпеки функціонування атомних електростанцій (АЕС) є пріоритетним завданням в умовах довгострокової експлуатації енергоблоків. Одним із ключових елементів в системі забезпечення безпеки є своєчасна та якісна технічна діагностика енергообладнання, яка дозволяє виявляти потенційні дефекти, прогнозувати відмови, порушення умов експлуатації і запобігати аварійним ситуаціям. Сучасні нормативні документи, що регламентують діагностування тех.-нічного стану обладнання АЕС, потребують періодичного оновлення та вдосконалення у відповідь на технологічний прогрес, зміни в умовах експлуатації та накопичений досвід функціонування об'єктів атомної енергетики.

На сьогодні особливої актуальності набуває адаптація нормативних підходів до умов тривалої експлуатації, з урахуваннямстаріння матеріалів, зношування елементів енергосистем, появи нових методів діагностики та аналітичного прогнозування. Недостатня точність або застарілі підходи до технічного контролю можуть стати джерелом додаткових ризиків для енергоблоків, що експлуатуються понад проектні строки[1-3].

Мета даної роботи – обґрунтувати необхідність удосконалення чинної нормативної бази та запропонувати оновлені підходи до технічної діагностики енергообладнання АЕС. У статті проаналізовано існуючі нормативні вимоги, виявлено їхні обмеження, а також окреслено напрямки гармонізації з міжнародними стандартами та сучасними практиками оцінювання технічного стану обладнання.

© Овчаров О. О., Котелевець К. А. 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі останніх років активно досліджуються питання підвищення надійності та безпеки атомних електростанцій, зокрема шляхом впровадження сучасних методів діагностики та удосконалення нормативної бази [4, 5]. Удосконалення технічної діагностики енергетичного обладнання атомних електростанцій, зокрема стрижнів турбогенераторів, є одним із ключових напрямів забезпечення їхньої надійної та безпечної експлуатації [6, 7]. Сучасні наукові дослідження зосереджуються на розвитку методів неінвазивного контролю, аналізу теплопровідності та нормативного супроводу діагностичних процедур. Дослідження зосереджені на використанні теплових, вібраційних та електромагнітних методів діагностики. Зокрема, особлива увага приділяється стрижневій зоні обмоток статора, як одній з критичних у контексті деградації теплофізичних характеристик.

Останні роботи [8-10] свідчать про зростання інтересу до теплової діагностики обмоток статора, оскільки зниження тепловіддачі у стрижнях може бути маркером пошкоджень або погіршення контакту. Розрахункове моделювання теплопровідності стрижнів дозволяє не лише виявити небезпечні зони, але й прогнозувати подальший технічний стан обладнання.

У нормативній сфері також спостерігається активне оновлення підходів до технічної діагностики[11-15]. Наприклад, рекомендації МАГАТЕ [13] та оновлені стандарти IEEE [14, 15] містять положення щодо діагностики перегріву, часткових розрядів і старіння ізоляції обмоток, акцентуючи на важливості інтерпретації результатів у контексті довгострокової експлуатації. Крім того, все більшого поширення набувають цифрові інструменти прогнозної діагностики. Застосування цифрових двійників турбогенераторів для моніторингу теплових і електромагнітних параметрів дозволяє інтегрувати діагностику у систему управління надійністю [16, 17].

Таким чином, удосконалення нормативних підходів до діагностики стрижнів турбогенераторів потребує міждисциплінарного підходу, що поєднує теплотехнічне моделювання, сучасні засоби моніторингу та адаптацію міжнародних стандартів до умов конкретних АЕС. Сучасна наукова думка сходиться на тому, що ефективне технічне діагностування стрижнів турбогенераторів повинне поєднувати: моделювання теплових характеристик, використання неінвазивних методів контролю, оновлення нормативно-правових вимог до діагностики обладнання в умовах довгострокової експлуатації.

Методика технічної діагностики в контурі охолодження стержнів обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000

Забезпечення надійної тепловіддачі у стрижнях обмотки статора турбогенераторів є критично важливим аспектом їх безпечної експлуатації. У контексті довгострокової експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000-2У3, що встановлені на енергоблоках українських АЕС, пропонується впровадити в нормативне забезпечення комплексну методику технічної діагностики, спрямовану на своєчасне виявлення порушень у системі охолодження та попередження аварійних ситуацій (Рис. 1).

Першочергово проводиться аналіз технічної документації, схем охолодження та конструктивних особливостей обмотки статора. Визначаються контрольовані елементи – стрижні обмотки, через які циркулює деіонізована вода як охолоджувальне середовище. Встановлюються допустимі параметри температури, витрати теплоносія та теплопровідності, які слугують еталонними для подальших оцінок.

На наступному етапі проводиться технічна діагностика за основними методами, що включають різні види та методи контролю. За нормативними вимогами, проводиться вимірювання температур на вході та виході охолоджувального каналу кожного стрижня з метою визначення ефективності охолодження та можливої закупорки каналу. Також, визначається інтенсивність водообміну у кожному каналі за допомогою витратомірів з метою виявлення відхилення від норми (зокрема, різке зниження або нульове значення витрати), що може свідчити про дефекти в контурі охолодження або критичне забруднення. Використовуючи розрахункову модель теплопередачі, оцінюється тепловіддача кожного стержня. Додатково вимірюється опір ізоляції обмотки та втрати на діелектричні струми, що можуть свідчити про порушення герметичності охолоджувального каналу або зволоження ізоляції. Також проводиться тепловізійний та акустичний контроль (опціонально) в умовах зупинки або зниженого навантаження для виявлення локальних зон перегріву, а також застосовуються неруйнівні методи контролю (ультразвуковий, вихрострумовий тощо) для уточнення стану металу.

Рис. 1– Візуалізація етапів технічної діагностики стрижнів обмотки статора турбогенератора
Fig. 1 – Visualization of the stages of technical diagnostics of the stator winding rods of a turbogenerator

На наступному етапі за результатами діагностики встановлюється технічний стан кожного стрижня:

- Нормальний стан - тепловіддача > 1,0 Вт; стабільна температура та витрати.
- Гранично припустимий стан тепловіддача в межах 0,5–1,0 Вт; потребує посиленого моніторингу.
- Критичний стан - тепловіддача < 0,5 Вт або нульова витрата; необхідна негайна заміна.

У випадку виявлення порушень тепловіддачі пропонується введення коригувальних дій, що можуть включати профілактичні та відновлювальні роботи:

- Промивання та очищення охолоджувальних каналів.
- Заміна окремих стрижнів або секцій обмотки.
- Корекція параметрів теплоносія (температура, тиск, склад).
- Внесення змін до графіків технічного обслуговування з урахуванням виявлених дефектів.

Усі результати вимірювань, розрахунків і виявлених дефектів фіксуються в технічному журналі. Інформація включається до паспортів обладнання та баз даних системи технічного обслуговування та ремонту (ТОіР) та у систему технічної експлуатації турбогенератора (як частина PLiM — Plant Life Management).

Нормативна програма, що пропонується, визначає етапи випробувань з діагностики витрати охолоджувальної води (дистиляту) в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора ТВВ-1000 і встановлює склад, зміст і послідовність проведення робіт з обстеження турбогенератора ТВВ-1000 з використанням ультразвукового методу контролю. Роботи виконуються під час планових капітальних ремонтів турбогенератора і враховують загальні вимоги до документації щодо проведення обстеження та результати випробувань, які повинні оформлятися протоколами та реєструватися в журналі обліку результатів контролю відповідно до вимог.

Метою випробувань є отримання об'єктивних даних щодо витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора ультразвуковим методом, який використовується для оцінки технічного стану системи охолодження стрижнів обмотки статора і турбогенератора в цілому.

Введення технічного параметра «витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статор» для оцінки стану турбогенератора обумовлено:

- відсутністю діагностики даного параметра (конструкція турбогенератора типу ТВВ-1000, що експлуатуються на енергоблоках АЕС України, не передбачає встановлення датчиків вимірювання витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора);

- спрацьовуванням захистів по перевищенню температури обмотки статора;

- збільшеною кількістю порушень умов нормального функціонування окремих вузлів і деталей турбогенератора (пошкодження обмотки статора, роз'єднання розпірно-клинових вузлів лобових частин, зламки елементарних провідників стрижнів у місцях пайки їх до наконечників, порушення герметичності системи водяного охолодження обмотки статора), які обумовлені електричними та тепломеханічними процесами.

Нормативна програма передбачає відпрацювання методології визначення витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора за допомогою ультразвукового витратоміра, що забезпечує отримання точної і надійної оцінки швидкості потоку в трубопроводах без розущільнення системи охолодження. За результатами вимірювань необхідно провести порівняльний аналіз отриманих в ході випробувань значень витрати охолоджувальної води з розрахунковими (теоретичними) даними і результатами попередніх вимірювань для подальшого визначення динаміки зміни стану внутрішніх поверхонь трубопроводів охолодження стрижнів обмотки статора, а також порожнистих провідників стрижнів обмотки. У разі відсутності даних попередніх вимірювань результати поточного вимірювання при розрахунках будуть вважатися вихідними.

Отримання достовірних даних щодо витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора ТГ необхідно для вирішення таких завдань: оцінка технічного стану ТГ; підвищення експлуатаційної надійності; визначення допустимих робочих параметрів ТГ; оптимізація структури ремонтного циклу; оптимізація витрат на проведення ремонтних робіт і модернізацію обладнання.

При підготовці системи охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора до випробувань виконати наступні роботи:

- персонал, який виконує випробування, повинен вивчити послідовність і методику їх проведення, а також заходи безпеки та умови проведення робіт;

- насоси подачі охолоджувальної води в колектор включити, систему охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора заповнити дистилятом і знеповітрити;

- підготувати вимірювальні прилади, що використовуються при випробуваннях;

- підготувати і перевірити відповідні дроти для складання випробувальних схем;

- зафіксувати значення вологості, температури і тиску в приміщенні.

Перед виконанням випробувань провести зовнішній огляд:

- щільність закріплення обмотки в пазах;

- встановлення клинів по довжині паза (зазори, збіг вентиляційних каналів);

- виповзання підклинових прокладок у бік лобових частин;

- стану пазових клинів;

- кріплення шлангів водопідведення, їх деформацію, розтріскування;

- кріплення колекторів;

- стан ущільнювачів;

- стан мережі заземлення.

Якщо під час огляду виявлено зовнішні пошкодження, вони повинні бути усунені до початку випробувань. Також, необхідно провести спеціальні випробування обмотки статора на гідравлічну та газову щільність, оскільки нещільності водяного тракту призводять або до потрапляння водню в систему охолоджувальної води, що порушує нормальну циркуляцію води і викликає перегрів ізоляції стрижнів, або до потрапляння води всередину корпусу статора, що знижує електричну міцність обмотки статора. Перед початком основного етапу (рис.1) необхідно перевірити параметри, що характеризують вихідний стан системи охолодження стрижнів обмотки статора, а саме: тиск дистиляту в колекторі водяного охолодження; температури дистиляту кожного стрижня; якість дистиляту pH, R, Cu, O_2; вміст водню в пастці; механічні домішки; технологічну сигналізацію. Якщо показники параметрів, що характеризують вихідний стан системи охолодження стрижнів обмотки статора, відрізняються від прийнятих норм (табл.1), має бути прийнято рішення про подальше проведення випробувань.

Таблиця 1
Нормативні показники якості дистиляту
Table 1
Standard indicators of distillate quality

Позначення	Параметр	Значення параметру
R, кОм/см^2	Питомий електричний опір при температурі 25 °С, не більше	200
pH	Показник pH при температурі 25 °С,	8,5 ± 0,5 %
O_2, мкг/кг	Вміст кисню, не більше	400
Cu, мкг/кг	Вміст сполук міді, не більше	100

Вимірювання для визначення витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора проводиться на фторопластових трубопроводах без розущільнення конструкції контуру охолодження.

Характеристики місця вимірювання наступні:

- фторопластовий трубопровід , зовнішній діаметр 28,0 мм, товщина стінки 3 ± 0,5 мм;
- наявна пряма ділянка до 200 мм;
- тиск охолоджувальної води від 1,0 кгс/см^2 до 5,0 кгс/см^2;
-температура поверхні стрижнів на зупиненому турбогенераторі від 25 °С до 30 °С.

Вимірювання проводиться за допомогою портативного імпульсного витратоміра-лічильника рідини FLUXUS ADM F601(F). Основними функціональними характеритиками витратоміра є:

- графічний РК-дисплей;
- інтерфейс RS232/USB;
- вихід 4-20 mA;
-можливість роботи в якості теплолічильника і вимірювання товщини стінки трубопроводу;
- два ультразвукових накладних датчика;
- точність вимірювання - 0,1% вимірюваного значення ± 15 µA;
- пам'ять більше 100000 точок вимірювання;
- частотний вихід – діапазон 0…5 кГц.

Технологія витратоміра дозволяє проводити точне двонаправлене вимірювання витрати за рахунок використання неінвазивного методу з накладними датчиками і протистояти таким несприятливим факторам, як електричні наведення на систему від сусідніх силових кабелів і короткочасним перешкодам для акустичного сигналу (рис. 2).

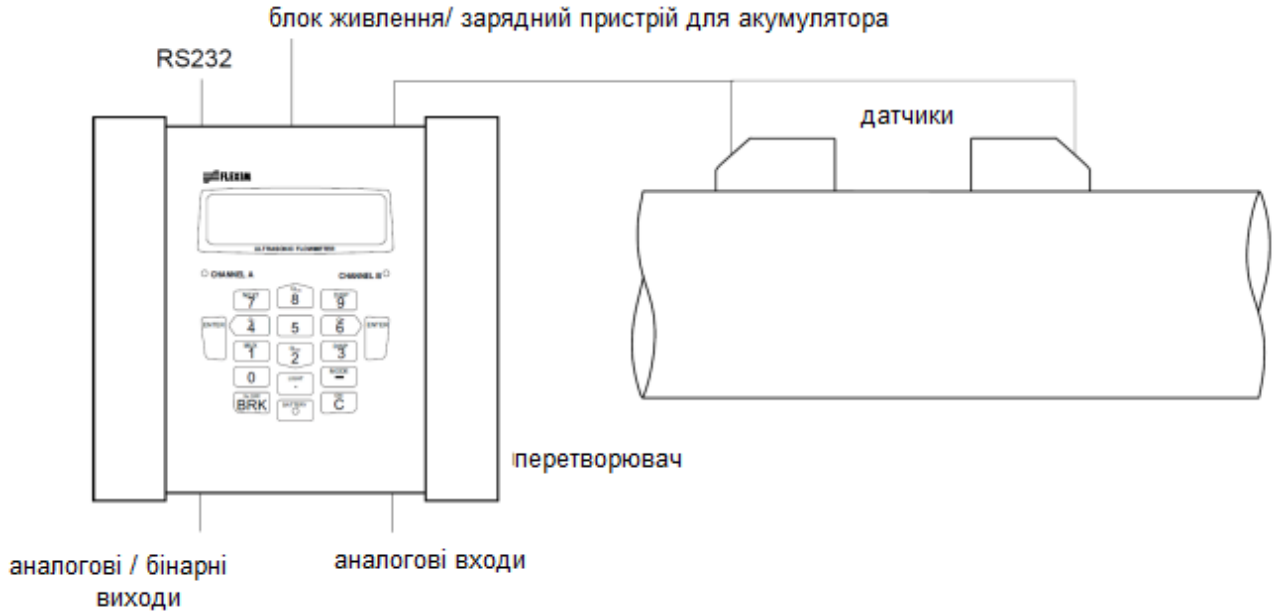

Рис. 2– Вимірювальна схема витратоміра
Fig. 2 – Flowmeter measurement diagram

Вимірювання витрати води проводяться на зливі охолоджувальної води (з боку турбіни) на гідравлічних гілках. Крім вимірювання витрати виконуються вимірювання швидкості потоку охолоджувальної води на виходах з водяних камер кожного стрижня обмотки статора ТГ, витрати охолоджувальної води у відводах від зливного колектора, температури охолоджувальної води у вихідному (зливному) колекторі, товщини стінок фторопластових трубопроводів. Результати кожного проведеного вимірювання повинні бути зведені в таблицю протоколу випробувань, який містить виміряні параметри якості дистиляту в порівнянні з нормативними (табл. 1) та вимірювання витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора з вказанням наступних параметрів: витрата, л/с; діаметр трубо проводу, мм; товщина стінки трубопроводу, мм; витрата від зливного колектора, $м^3$/год; тиск води, кг/ $см^2$; температура води на вході та на виході, ºС.

Операції з вимірювання розпочинаються після проведення високовольтних випробувань ізоляції обмоток статора турбогенератора і заповнення дистилятом системи охолодження стрижнів обмотки. Вибравши одну з гідравлічних гілок стрижнів обмотки необхідно встановити вимірювальні накладні датчики ультразвукового контролю на фторопласттовому трубопроводі на прямій ділянці трубопроводу, на виході дистиляту з водяних камер головок стрижнів обмотки, попередньо підготувавши поверхню трубопроводу (нанесення гелю) та підключити витратомір. Час вимірювання – до отримання сталого сигналу, але не менше 30 с. При цьому фіксація значень витрати проводиться щосекунди на всьому протязі отримання сталого сигналу для мінімізації помилок при виконанні операцій. Нумерацію трубопроводів охолоджувальної води стрижнів обмотки статора необхідно прийняти відповідно до схеми розташування верхніх і нижніх стрижнів обмотки статора турбогенератора, як це показано на рис. 3. Кожне наступне вимірювання робиться в такій ж самій послідовності операцій на всіх гідравлічних гілках стрижнів обмотки статора турбогенератора.

Вимоги щодо врахування перепаду по висоті місця вимірювання витрати води відносно місця вимірювання тиску води реалізовуються при виконанні гідравлічних розрахунків. За результатами вимірювань оформляються гідравлічні розрахунки по швидкості потоку охолоджуючої води, тепловіддачі та інтенсивності теплообміну, а також проводиться порівняльний аналіз розрахункових параметрів і даних, отриманих експериментальним шляхом в ході проведення вимірювань витрати охолоджувальної води в контурі охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора. Після проведення дослідно-розрахункових операцій робляться висновки про динаміку зміни стану внутрішніх поверхонь трубопроводів охолодження стрижнів обмотки статора турбогенератора, про технічний стан порожнистих провідників за прохідністю в стрижнях і, відповідно, оцінюється достатність теплообміну контуру охолодження по кожному стрижню обмотки статора турбогенератора.

Запропонована нормативна програма дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні зони в системі охолодження стержнів обмотки турбогенератора, знижує ризик аварій, подовжує ресурс експлуатації турбогенераторів та підвищує загальний рівень ядерної безпеки об'єкта.

Висновки

Удосконалення нормативних підходів до технічної діагностики енергообладнання АЕС, зокрема стрижнів турбогенераторів, є ключовим чинником забезпечення надійності та ядерної безпеки при тривалій експлуатації енергоблоків. Для забезпечення безпеки окремого обладнання та енергоблоків АЕС в цілому запропонована методика, яка базується на контролі витрати охолоджувальної води з використанням ультразвукових вимірювань та теплотехнічного аналізу, яка дозволяє своєчасно виявляти дефекти охолодження, зниження тепловіддачі та інші критичні відхилення. Визначено діапазони допустимих теплотехнічних параметрів стрижнів обмотки, що забезпечує можливість об’єктивної оцінки їх технічного стану. Це створює підґрунтя для впровадження профілактичних заходів і корегувальних дій у межах планово-попереджувального обслуговування, а також удосконалення графіків технічного обслуговування та оптимізації експлуатаційної стратегії турбогенераторів. Результати дослідження підтверджують доцільність інтеграції запропонованої методики в системи управління ресурсом обладнання (PLiM) в рамках комплексної програми технічної діагностики при прийняті рішень щодо подальшої роботи енергоблоку у позапроєктні терміни, та дає змогу перейти від реактивного до превентивного технічного обслуговування і підвищити загальну ефективність експлуатації турбогенераторів в умовах сучасних вимог ядерної безпеки.

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.

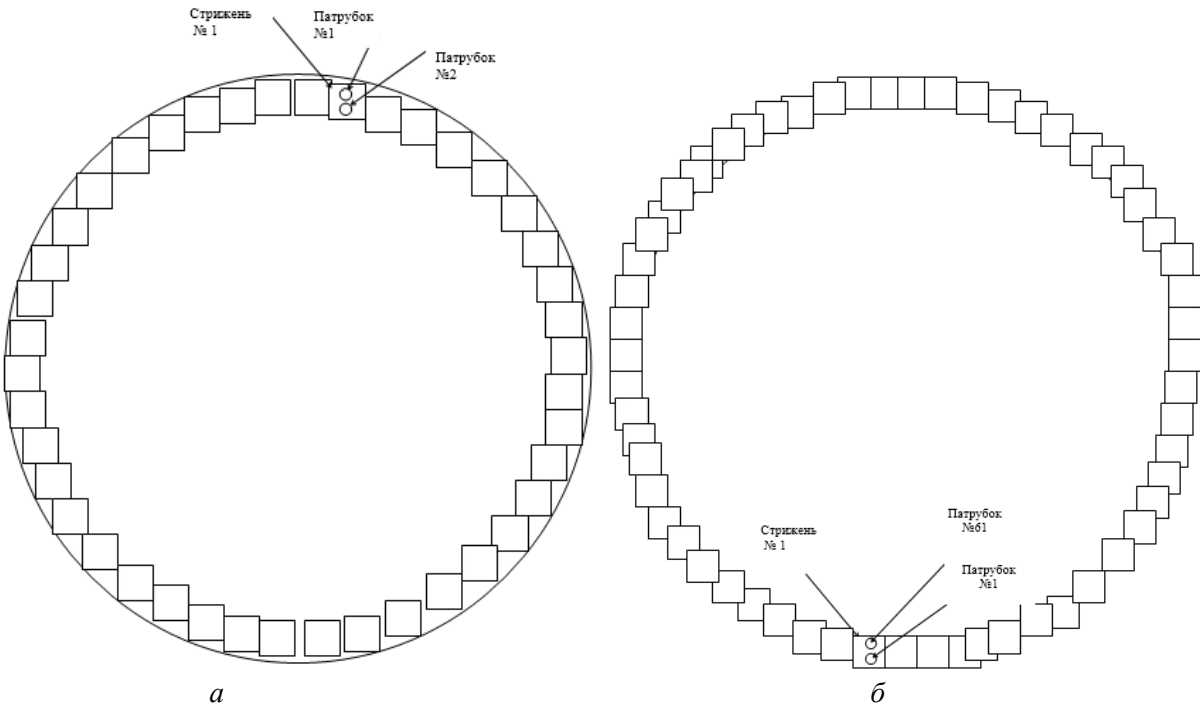

Рис. 3– Схема розташування верхніх і нижніх стрижнів обмотки статора турбогенератора:
а - Кількість стержнів – 42, 1 – верхній патрубок, 2- нижній патрубок
б - Кількість стержнів – 60, 1 – верхній патрубок, 61- нижній патрубок
Fig. 3 – Layout of the upper and lower rods of the stator winding of the turbogenerator:
a - Number of rods - 42, 1 - upper branch pipe, 2 - lower branch pipe
б - Number of rods - 60, 1 - upper branch pipe, 61 - lower branch pipe

Список використаних джерел:

1. (2024). Sustainable energy safety management utilizing an industry-relative assessment of enterprise equipment technical condition / Hrinchenko H., Prokopenko O., Shmygol N., Koval V., Filipishyna L., Palii S., Cioca L.-I.. // Sustainability. – 2024. – № 16(2). – P. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/su16020771
2. An approach to ensure operational safety for renewable energy equipment / Hrinchenko H., Kupriyanov O., Khomenko V., Khomenko S., Kniazieva V. // Circular economy for renewable energy / eds. V. Koval, P. Olczak. – Springer, 2023. – Pp. 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
3. Approaches to sustainable energy management in ensuring safety of power equipment operation / Hrinchenko H., Koval V., Shmygol N., Sydorov O., Tsimoshynska O., Matuszewska D. // Energies. – 2023. – № 16(18). – 6488. DOI: https://doi.org/10.3390/en16186488
4. Zou Z. Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation in inverter-fed machines: A review / Zou Z., Liu S., Kang J. // World Electric Vehicle Journal. – 2024. – № 15(10). – P. 444. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj15100444
5. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: Європейський Зелений Курс / Г. С. Грінченко, О. А. Ковтун, В. В. Миколайко, Р. О. Нестеренко, Н. С. Антоненко // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 30. – С. 61–72. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72
6. Engineering management of energy utilities for sustainable development / Hrinchenko H., Antonenko N., Tarasov I., Trokhymenko G., Magas N., Sarzhynskyi S. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2024. – № 1429(1). – 012017. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012017

7. Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management / Hrinchenko H., Udovychenko V., Generalov O., Parfentieva O., Neskhodovskyi I., Kopacz M. // Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. – 2024. – № 27(3). – Pp. 109–132. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/190811
8. Study on the thermal field of a hydro-generator under the effect of a plateau climate / Shan R., Duan J., Zeng Y., Qian J., Dong G., Zhu M., Zhao J. // Energies. – 2024. – № 17(4). – P. 932. DOI: https://doi.org/10.3390/en17040932
9. Research on stator main insulation temperature field of air-cooled turbo-generator after main insulation shelling / Li W., Li Y., Su Y., Wang P., Liu W. // Energies. – 2018. – № 11(5). – P. 1101. DOI: https://doi.org/10.3390/en11051101
10. Loss and thermal analysis of a high-power-density permanent magnet starter/generator / Ren X., Chen Z., Du R., Feng M. // Energies. – 2024. – № 17(20). – P. 5049. DOI: https://doi.org/10.3390/en17205049
11. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств / Г. С. Грінченко та інші // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2024. – Вип. 34. – С. 17–30. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02
12. Дослідження вимог міжнародних стандартів IEC 60880 та IEC 62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки / Б. Ю. Вінтенко та інші // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2023. – № 3(73). DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155
13. Maintenance, testing, surveillance and inspection in nuclear power plants (IAEA Safety Standards Series No. SSG-74) / International Atomic Energy Agency. – 2022. – Access mode : https://www.iaea.org/publications/14905/maintenance-testing-surveillance-and-inspection-in-nuclear-power-plants (Last accessed November 4, 2025)
14. IEEE guide for failure investigation, documentation, analysis, and reporting for power transformers and shunt reactors (IEEE Std C57.125-2015). DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.8741317
15. IEEE standard test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid-immersed distribution and power transformers – Redline (IEEE Std C57.100-2011). https://ieeexplore.ieee.org/document/6172694
16. From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry / M. Molęda et al // Sensors. – 2023. – № 23(13). – 5970. DOI: https://doi.org/10.3390/s23135970

Predictive maintenance system for high-end equipment in nuclear power plant under limited degradation knowledge / X. Liu et al // Advanced Engineering Informatics – 2024. – № 61. – 102506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102506

Отримано: 25.08.2025 Прийнято: 04.11.2025 Опубліковано: 30.12.2025

[1]OVCHAROV O.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0764-4063
[1]KOTELEVETS K.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: kyrylo.ktl@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8811-8848
[1]V. N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

IMPROVEMENT OF REGULATORY APPROACHES TO TECHNICAL DIAGNOSTICS OF NPP POWER EQUIPMENT

Abstract.. The article discusses the problem of improving regulatory approaches to technical diagnostics of power equipment at nuclear power plants, in particular the stator winding rods of TVV-1000 type turbogenerators. The relevance of the topic is due to the need to improve reliability and safety in conditions of beyond-design-basis operation of power units and the development of appropriate regulatory programmes for technical diagnostics. Based on a review of current international and domestic standards and an analysis of the latest methods of thermal and non-invasive diagnostics, the paper proposes a step-by-step regulatory programme for diagnosing cooling water consumption in the cooling system of turbogenerator stator cores, based on the use of an ultrasonic flow meter and thermal analysis algorithms. Criteria for assessing the technical condition of the bars are defined and appropriate corrective actions are proposed when deviations are detected during preventive maintenance work for power units of nuclear power plants. The results obtained can be integrated into PLiM turbine generator resource management systems.

KEYWORDS: *turbogenerator, rods, thermal conductivity, standardized recommendations, technical diagnostics.*

In cites: Ovcharov O., Kotelevets K. (2025), improvement of regulatory approaches to technical diagnostics of NPP power equipment. *Engineering, (36),* 119-128. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-11 (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. Hrinchenko, H, Prokopenko, O, Shmygol, N, Koval, V, Filipishyna, L, Palii, S & Cioca, L-I 2024, 'Sustainable energy safety management utilizing an industry-relative assessment of enterprise equipment technical condition', *Sustainability*, no 16(2), P. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/su16020771 (in Ukraine)
2. Hrinchenko, H, Kupriyanov, O, Khomenko, V, Khomenko, S & Kniazieva, V 2023, 'An approach to ensure operational safety for renewable energy equipment', In V. Koval & P. Olczak (Eds.), *Circular economy for renewable energy*, Springer, Pp. 1-17 DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1 (in Ukraine)
3. Hrinchenko, H, Koval, V, Shmygol, N, Sydorov, O, Tsimoshynska, O & Matuszewska, D 2023, 'Approaches to sustainable energy management in ensuring safety of power equipment operation', *Energies*, no 16(18), P. 6488. DOI: https://doi.org/10.3390/en16186488 (in Ukraine)
4. Zou, Z, Liu, S & Kang, J 2024, 'Degradation mechanism and online electrical monitoring techniques of stator winding insulation in inverter-fed machines: A review', *World Electric Vehicle Journal*, no 15(10), P. 444. DOI: https://doi.org/10.3390/wevj15100444
5. Hrinchenko, HS, Kovtun, OA, Mykolaiko, VV, Nesterenko, RO & Antonenko, NS 2022, 'Zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky AES u ponadproiektnyi termin v konteksti perekhodu do tsyrkuliarnoi ekonomiky: Yevropeiskyi Zelenyi Kurs' [Ensuring operational safety of NNP beyond the design life in the context of the transition to a circular economy: the European Green Deal.], *Mashynobuduvannia,* iss. 30, Pp. 61–72. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72 (in Ukraine)
6. Hrinchenko, H, Antonenko, N, Tarasov, I, Trokhymenko, G, Magas, N & Sarzhynskyi, S 2024, 'Engineering management of energy utilities for sustainable development', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, no 1429(1), 012017. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1429/1/012017 (in Ukraine)

7. Hrinchenko, H, Udovychenko, V, Generalov, O, Parfentieva, O, Neskhodovskyi, I, & Kopacz, M 2024, 'Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management', *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, no 27(3), Pp. 109–132. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/190811 (in Ukraine)
8. Shan, R, Duan, J, Zeng, Y, Qian, J, Dong, G, Zhu, M & Zhao, J 2024, 'Study on the thermal field of a hydro-generator under the effect of a plateau climate', *Energies*, no 17(4), P. 932. DOI: https://doi.org/10.3390/en17040932
9. Li, W, Li, Y, Su, Y, Wang, P & Liu, W 2018, 'Research on stator main insulation temperature field of air-cooled turbo-generator after main insulation shelling', *Energies*, no 11(5), P. 1101. DOI: https://doi.org/10.3390/en11051101
10. Ren, X, Chen, Z, Du, R & Feng, M 2024, 'Loss and thermal analysis of a high-power-density permanent magnet starter/generator', *Energies*, no 17(20), P. 5049. DOI: https://doi.org/10.3390/en17205049
11. Hrinchenko, HS, Kiporenko, OV, Nehodov, SS, Lysenko, AYa, Mazorchuk, KK & Nos, RS 2024, 'Development of a regulatory approach to assessing the risks of energy enterprises', *Mashynobuduvannia,* no 34, Pp. 17–30. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02 (in Ukraine)
12. Vintenko, BYu, Smirnov, OA, Kovalenko, AS, Smirnov, SA & Buravchenko, KO 2023, 'Research into the requirements of international standards IEC 60880 and IEC 62138 for the development of software for AES information and control systems important for safety', *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku,* no 3(73). DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155 (in Ukraine)
13. International Atomic Energy Agency 2022, *Maintenance, testing, surveillance and inspection in nuclear power plants (IAEA Safety Standards Series No. SSG-74*), viewed <https://www.iaea.org/publications/14905/maintenance-testing-surveillance-and-inspection-in-nuclear-power-plants>
14. IEEE 2015, *IEEE guide for failure investigation, documentation, analysis, and reporting for power transformers and shunt reactors (IEEE Std C57.125-2015*). DOI: https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.8741317
15. IEEE 2012, *IEEE standard test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid-immersed distribution and power transformers – Redline (IEEE Std C57.100-2011),* viewed <https://ieeexplore.ieee.org/document/6172694>
16. Molęda, M, Małysiak-Mrozek, B, Ding, W, Sunderam, V & Mrozek, D 2023, 'From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry', *Sensors*, no 23(13), P. 5970. DOI: https://doi.org/10.3390/s23135970

Liu, X, Cheng, W, Xing, J, Chen, X, Li, L, Guan, Y, Ding, B, Nie, Z, Zhang, R & Zhi, Y 2024, 'Predictive maintenance system for high-end equipment in nuclear power plant under limited degradation knowledge', *Advanced Engineering Informatics*, no 61, 102506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102506

Submission received: 08/25/2025 Accepted: 11/04/2025 Published: 12/30/2025

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 невирішених 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 36

Українською та англійською мовами

Макетування та комп`ютерне верстання
Головченко Богдан

Підписано до друку 22.12.2025. Формат 60х84/8.
Ум. др. арк. 10,09, Обл.-вид. арк.. 12,61
Наклад 50 пр. Зам. №41/25

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