



32

Прикладна механіка
Матеріалознавство
Галузеве машинобудування
Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

Applied Mechanics
Material Science
Industry Engineering
Metrology and Information-
Measuring Equipment

ISSN 2079-1747
DOI 10.32820/2079-1747-2023-32

Міністерство освіти і науки України
Українська інженерно-педагогічна
академія

Машинобудування

Engineering

Збірник наукових праць
Видається 2 рази на рік
Видається з грудня 2007 р.

Збірник наукових праць
«Машинобудування» входить
до Категорії Б наукових фахових
видань, включених до Переліку
наукових фахових видань України
(технічні науки), в яких можуть
публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття
наукових ступенів доктора наук
і доктора філософії (кандидата наук),
наказ МОН України №409 від
17.03.2020 та №320 від 07.04.2022.

УІПА

2023
Харків

Редакційна колегія:**Головний редактор**

Купріянов О. В., д.тех.н., проф.

Заступник головного редактора:

Фідровська, Н. М., д.тех.н., проф.

Члени колегії:

Васілевський О. М., д.тех.н., проф.

Грінченко Г.С., к.тех.н., доц.

Залога В. О., д.тех.н., проф.

Канюк Г. І., д.тех.н., проф.

Кириченко І. Г., д.тех.н., проф.

Кучерук В. Ю., д.тех.н., проф.

Ларшин В. П., д.тех.н., проф.

Литвин О. М., д. физ.-мат. н., проф.

Ловейкін В. С., д.тех.н., проф.

Петраков Ю.В., д.тех.н., проф.

Ромасевич Ю.О., д.тех.н., доц.

Рябчиков М. Л., д.тех.н., проф.

Склярів В. В., д.тех.н., старш. наук. співр.

Соколов В. І., д.тех.н., проф.

Ступницький В. В., д.тех.н., проф.

Супонев В. М., д.тех.н., проф.

Триш Р. М., д.тех.н., проф.

Хавін Г. Л., д.тех.н., проф.

Хімічева Г. І., д.тех.н., проф.

Хорошилов О. М., д.тех.н., доц.

Яковлев М. Ю., д.тех.н., проф.

Alper Uysal, Ph.D., Assoc. Prof.

Dagmar Caganova, Ph.D., Assoc. Prof.

Dimitar Dichev, D.Sc., Prof.

Iliya Zhelezarov, Ph.D., Prof.

Milan Edl, Ph.D., Assoc. Prof.

Predrag Dasic, D.Sc., Prof.

Відповідальні редактори

Подольак О.С., к.тех.н., доц.

Грінченко Г.С., к.тех.н., доц.

Випусковий редактор

Фурсова Т.М.

Відповідальний секретар

Фурсова Т.М.

Адреса редакції:

Україна, 61003, м. Харків

вул. Університетська, 16

Українська інженерно-педагогічна академія

Тел. (057)733-79-17

Факс (057)731-32-36

E-mail: mashynobuduvannia@uipa.edu.ua

<http://jmash.uipa.edu.ua>

Address of editorial office:

16 Universitetska vul., Kharkiv

61003, Ukraine

Ukrainian Engineering Pedagogics Academy

Tel. (057)733-79-17

Fax (057)731-32-36

Машинобудування

2023, № 32

Збірник наукових праць

Засновник

Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА)

Видається з грудня 2007 р.

Свідectво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 12132 – 1016P від 26.12.2006.
ISSN 2079-1747
DOI 10.32820/2079-1747-2023-32

Мови видання:

українська, англійська

Друкується за рішенням Науков-технічної ради
УІПА, протокол № 6 від 27.02.2024 р.

При використанні матеріалів збірника посилання
на збірник – обов'язкове.

Журнал відображено у базах даних:

Національна бібліотека України імені

В. І. Вернадського – <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/>

Bielefeld Academic Search Engine –

<https://www.base-search.net/>

Index Copernicus – <http://www.indexcopernicus.com/>

Google Scholar – <http://scholar.google.com.ua/>

OpenAIRE (Open Access Infrastructure for Research
in Europe) – <https://www.openaire.eu/>

WorldCat – <https://www.worldcat.org/>

© Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА), Харків, 2023

Шановні автори публікацій!

Редакційна колегія збірника «Машинобудування» вживає заходів щодо підвищення якості нашого видання, спрямовані на входження в провідні світові наукометричні бази. З цією метою сайт збірника перенесений на платформу Open Journal Systems і впроваджується незалежне рецензування рукописів, що подаються до публікації. Збірник «Машинобудування» тепер має власний сайт, який розташовується за посиланням: <http://jmash.uipa.edu.ua>

Використання платформи Open Journal Systems дозволяє автоматизувати весь видавничий процес: подачу рукописів авторами, рецензування, внесення редакторських правок, розміщення статей у відкритому доступі і їх подальше індексування наукометричними базами. Ми починаємо приймати рукописи через сайт збірника, і надавати там результати рецензування. Для цього всі учасники видавничого процесу, від авторів до рецензентів і редакторів, повинні зареєструватися на сайті. Сайт доступний в двох мовних версіях: українська та англійська, тому у наших іноземних авторів не повинно бути мовних проблем. На час перехідного періоду рукописи приймаються і за старою схемою, але давайте разом освоювати перспективну редакторську платформу.

З метою забезпечення високої якості видавання, статі, які отримали низьку оцінку рецензентів, не будуть опубліковані. У разі виникнення труднощів, пишть нам на E-mail: mashynobuduvannia@uipa.edu.ua.

Запрошуємо фахівців в галузі машинобудування та метрології брати участь у рецензуванні, в процесі реєстрації на сайті збірника є можливість подати запит на додавання в рецензенти.

Ми докладасмо зусиль по розширенню географії авторів, і запрошуємо як українських, так і зарубіжних авторів подавати рукописи до збірника. При подачі статті слід стежити за правилами оформлення та академічною доброчесністю.

Давайте разом постійно покращувати наш збірник з метою вивести його в лідери машинобудівного та метрологічного напрямків!

Головний редактор

Купріянов Олександр Володимирович

Dear Authors,

The editorial board of the journal "Engineering" is taking steps to improve the quality of our publication with the aim of entering the world's leading scientometric databases. Accordingly, the website of the journal is moving to the Open Journal Systems platform and an independent review of manuscripts submitted for publication is being introduced. The journal "Engineering" now has its own website, which you can visit following the link <http://jmash.uipa.edu.ua>.

Using the Open Journal Systems platform allows automating the entire publishing process, which includes submitting manuscripts by authors, reviewing, editing, publishing articles in the open access, and then indexing them by scientometric databases. We are beginning to accept manuscripts via the website of the journal, which is where we are also starting to present the results of reviewing. To this end, all participants in the publishing process, from authors to reviewers and editors, must register on the website. The website is available in two languages: Ukrainian and English, so our foreign authors will not encounter any language-related problems. During the transition period, the manuscripts are still accepted according to the previous scheme, but let us start exploring this promising editorial platform together.

In order to ensure high quality of published articles, those papers which have received a low rating from reviewers will not be published. In case of technical difficulties, please email us at mashynobuduvannia@uipa.edu.ua.

We are inviting specialists in the field of Mechanical Engineering and Metrology to take part in reviewing; for this purpose, while registering on the website of the journal there is an opportunity to submit a request to become a reviewer.

We are making efforts to expand the geography of the authors, so we are inviting both Ukrainian and foreign authors to submit manuscripts to the journal. When submitting an article, you should follow the guide for authors and the rules on academic honesty.

Let us together constantly improve our journal in order to make it a leader in the field of Mechanical Engineering and Metrology.

Oleksandr Kupriyanov

Editor-in-Ch

ЗМІСТ

<u>Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка</u>	5
Грінченко Г.С., Козлов М.С., Марченко О.О., Захаров С.О., Герасимов Є.В., Теслов О.А. Підвищення якості технології складання шляхом визначення величини замикаючої ланки в умовах термовпливу	5
Грінченко Г.С., Негодов С.С., Мазорчук К.К., Грінченко В.В., Тріщ Ю.В. Кваліметричне оцінювання індикаторів сталого розвитку: ціль 8. Гідна праця та економічне зростання	14
Крамаренко Ю.О., Дрозд В.А. Підвищення якості насосних установок шляхом удосконалення систем керування	29
Придворов С.С., Близниченко Г.С. Підвищення якості систем керування енергетичним обладнанням шляхом удосконалення математичного моделювання	37
Тріщ Р.М., Грінченко Г.С., Катрич О.О., Яковлев М.Ю., Багаєв І.О., Мірошник Є.І. Застосування чутливої статичної характеристики для оцінювання якості в машинобудуванні	46
Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Василець Т.Ю., Келеберда С.М., Пономаренко А.С., Чирочкін Д.О. Оптимізація показників якості технологічних процесів об'єктів керування в енергетиці	55
Князєва В.М., Насиров С.В., Малюта В.Є., Курільченко М.О., Колесник В.Б. Підвищення енергетичної ефективності транспортування газу шляхом оптимізації режимів роботи електроприводів	64
Мельников В.Є. Дослідження характеристик сонячного елемента при пошкодженні поверхні фотоелектричного модуля	72
Овчаров О.О., Лисенко А.Я. Аналіз нормативного забезпечення безпечної експлуатації та продовження ресурсу АЕС	80
До уваги авторів	93

DOI <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-5-13>

УДК 621.941.0.15:681.5

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ЗАМИКАЮЧОЇ ЛАНКИ В УМОВАХ ТЕРМОВПЛИВУ

© Грінченко Г.С.¹, Козлов М.С.¹, Марченко О.О.¹, Захаров С.О.¹,
Герасимов Є.В.¹, Теслов О.А.²

¹Українська інженерно-педагогічна академія

²Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@upra.edu.ua, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Козлов Максим Сергійович (Kozlov Maksym): ORCID: 0000-0001-8954-268X; e-mail: max_kozlov98@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Марченко Олександр Олексійович (Marchenko Oleksandr): ORCID: 0000-0002-7469-0089; e-mail: martkerrt@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Захаров Сергій Олександрович (Zakharov Serhii): ORCID: 0000-0001-8192-9126; e-mail: zaharov.lex@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Герасимов Євген Вікторович (Herasymov Yevhen): ORCID: 0000-0003-4026-2796; e-mail: zluger@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Теслов Олександр Анатолійович (Teslov Oleksandr): ORCID: 0000-0003-3673-9117; e-mail: trich_@ukr.net, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, Харківська область, 61000, Україна.

В статті запропоновано методику дослідження з визначення величини замикальної ланки під час розрахунку складальних розмірних ланцюгів з урахуванням впливу температурних зазорів. Представлений аналіз технологічної підготовки виробництва виявив необхідність включення розрахунку розмірних ланцюгів, як одного з елементів розмірного аналізу, що визначається сукупністю розрахунково-аналітичних процедур, які здійснюються під час розроблення та аналізу конструкцій і технологічних процесів. В свою чергу, ефективність розрахунку розмірних ланцюгів з використанням імовірнісного методу значною мірою залежить від того, якою мірою враховано вплив випадкових чинників на значення величин складових ланок і замикаючої ланки. Дослідження підтвердили, що розрахунок номінального значення замикальної ланки не відповідає вимогам, які були поставлені, якщо порівнювати його з результатами, отриманими під час розрахунку без урахування впливу температурних зазорів. Проте, практичне складання ротора живильного насоса типу СВПТ-340-1000 ЛМЗ з урахуванням впливу температурних зазорів може спричинити покращення точності складання в осьовому напрямку на рівень від 5% до 13% і зменшення зазору між торцями колеса ротора і розвантажувального диска на величину від 6% до 10% без необхідності використання додаткового технологічного обладнання.

Ключові слова: якість технології, точність складання, термовплив, розмірний ланцюг, замикаюча ланка.

Hrinchenko H., Kozlov M., Marchenko O., Zakharov S., Herasymov Ye., Teslov O.

“Improving the quality of assembly technology by determining the size of the closing link under thermal stress”

The article proposes a research methodology for determining the size of the closing link in the calculation of assembly dimensional chains, taking into account the influence of temperature gaps. The presented analysis of the technological preparation of production has revealed the need to include the calculation of dimensional chains as one of the elements of dimensional analysis, which is determined by a set of calculation and analytical procedures carried out during the development and analysis of structures and technological processes. In turn, the efficiency of dimensional chains calculation using the probabilistic method largely depends on the extent to which the influence of random factors on the values of the constituent links and the closing link is taken into account. Studies have confirmed that the calculation of the nominal value of the closing link does not meet the requirements set out in the specifications when compared with the results obtained when calculating without taking into account the influence of temperature gaps. However, the practical assembly of the rotor of the SVPT-340-1000 LMZ feed pump, taking into account the influence of temperature gaps, can lead to an improvement in the axial assembly accuracy by 5% to 13% and a reduction in the gap between the ends of the rotor wheel and the discharge disc by 6% to 10% without the need to use additional technological equipment.

Keywords: quality of technology, assembly accuracy, thermal influence, dimensional chain, closing link

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

Однією зі складових успішного виходу України на світовий ринок товарів є випуск конкурентоспроможної продукції, особливо в тих галузях, які традиційно забезпечують експорт країни. Машинобудування - ключова наукомістка галузь промисловості країни, оскільки її розвиток є визначальним для забезпечення якості продукції інших галузей національної економіки. Основним завданням сучасного машинобудування є випуск продукції високої якості та конкурентоспроможності. Якість продукції залежить від якості виготовлення окремих деталей і процесу їх складання.

Складання є завершальною стадією виготовлення машин і механізмів, яка багато в чому визначає експлуатаційну надійність і довговічність виробу. Слід зазначити, що основну частину складальних робіт становлять ручні слюсарно-складальні роботи, які потребують інколи великих витрат фізичної праці та високої кваліфікації виконавців. Тому економічні показники підприємства в багатьох випадках залежать від трудомісткості складального виробництва, а проблема підвищення якості та продуктивності складання є однією з найважливіших проблем науково-технічного прогресу сучасного машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На якість складання може впливати велика кількість чинників, зокрема ті, що не мають прямого відношення до складального процесу [1, 2], наприклад, похибки термічної, механічної та інших видів обробки деталей. Ці похибки прямо чи опосередковано можуть виявитися або в процесі складання, або в зібраному виробі і таким чином погіршити його якість.

У дослідженнях [3,4] такі положення було деталізовано. Так похибки складання почали розглядати за характером їхнього прояву (випадкові та систематичні), за типом посадок, взаєморозташування елементів, деформацій, стану сполучуваних поверхонь тощо.

Технологію складання з'єднання того чи іншого виду (циліндричне, конічне, плоске, різьбове тощо) обирають, зважаючи на характер посадки, з урахуванням її точності, розмірів деталей та їхньої точності, похибки форми й шорсткості поверхонь, конструктивних

елементів (фаски, розточування, проточки), потрібної точності відносного розташування деталей у з'єднанні і т.д. У роботах [5-9] розглянуто основні параметри, якими повинні володіти деталі, що надходять на складання. Найважливішим етапом у проектуванні технології є проектування операції власне складання на основі розрахунку збирання деталей. Обґрунтованість розрахунку залежить від ступеня врахування впливу раніше перерахованих факторів, а також від кінематичних, жорсткісних, силових і динамічних характеристик засобів технологічного оснащення.

У роботах [10, 11] розглядалися питання, пов'язані з розв'язанням проблеми збирання деталей у складальну одиницю за циліндричними посадковими поверхнями. Під час складання з натягом деталі мають бути виготовлені з фасками, оскільки їхня відсутність призводить до незбірності виробу через високу ймовірність упору торцевими поверхнями або збирання з ушкодженням крайок по контуру посадкової поверхні. Наявність фасок має велике значення, особливо під час автоматичного складання. І це є головною вимогою до технологічності деталі з точки зору складання. Детальніше питання складання з'єднань з малими зазорами і з натягом розглянуто в роботах [12, 13]. Незначний перекис осей деталей призводить до їх заклинювання, а невелике збільшення складального зусилля призводить до утворення задирів. Під час складання таких з'єднань, використовуючи різні пристрої корекції, в автоматичному режимі необхідно забезпечити малі ексцентриситет і кут перекосу осей.

Як уже зазначалося раніше, один із найважливіших показників якості - точність [14-17]. Під час складання основні технічні вимоги - це дотримання точності положення, обертання, лінійного переміщення тощо вузлів і деталей щодо будь-яких базових поверхонь. Точність відносного положення деталей, якщо на охоплюваній деталі немає наполегливого бурта, залежить від точності роботи складального механізму. Найбільшого ефекту під час розв'язання комплексної проблеми точності, продуктивності та економічності виробництва виробів (машини та прилади) загалом досягають тоді, коли цю проблему розв'язують із трьох основних позицій, що характеризують усі етапи виробництва та експлуатації: конструкторсько-експлуатаційних, технологічних і метрологічних.

Метою роботи є підвищення якості технології складання шляхом визначення величини замикаючої ланки складальних розмірних ланцюгів з урахуванням температурних зазорів, що виникають у процесі складання в умовах термовпливу.

Виклад основного матеріалу

Дослідження з визначення величини замикаючої ланки проводилися на зразках і натуральних виробках: вал і колеса ротора живильного насоса типу СВПТ-340-1000 ЛМЗ.

Методика досліджень передбачала:

- 1) вибір матеріалів, конструкції вузлів;
- 2) розрахунок складального розмірного ланцюга багатоелементного з'єднання ймовірнісним способом без урахування впливу температурних розширень матеріалу;
- 3) підготовка зразків і обладнання до експериментів;
- 4) визначення величини замикаючої ланки після складання ротора живильного насоса без урахування впливу температурних розширень матеріалу.

Під час вибору матеріалів зразків виходили з вимоги, що вони мають бути найпоширенішими в промисловості, за конструкцією і розмірами відповідати мінімальним витратам на виготовлення і відповідати поставленим завданням дослідження. Тому прийнятий матеріал - сталь 45. Хімічний склад і механічні властивості наведено в таблиці 1.

Загальний вигляд досліджуваних деталей представлено на рис.1.

Контрольованим розміром є відстань між торцями втулок під час складання за допомогою нагрівання. Для того, щоб провести дослідження процесу розсіювання розмірів, необхідно провести не менше 80 випробувань.

Таблиця 1 - Хімічний склад і механічні властивості металу зразків

Марка сталі	Хімічний склад, %					Механічні властивості		
	C	Si	Mn	S	P	Тимчасовий опір σ_B , кг/мм ²	Відносне подовження, %	Твердість, НВ
45	0,47	0,28	0,6	0,088	0,028	68	19	167 - 179

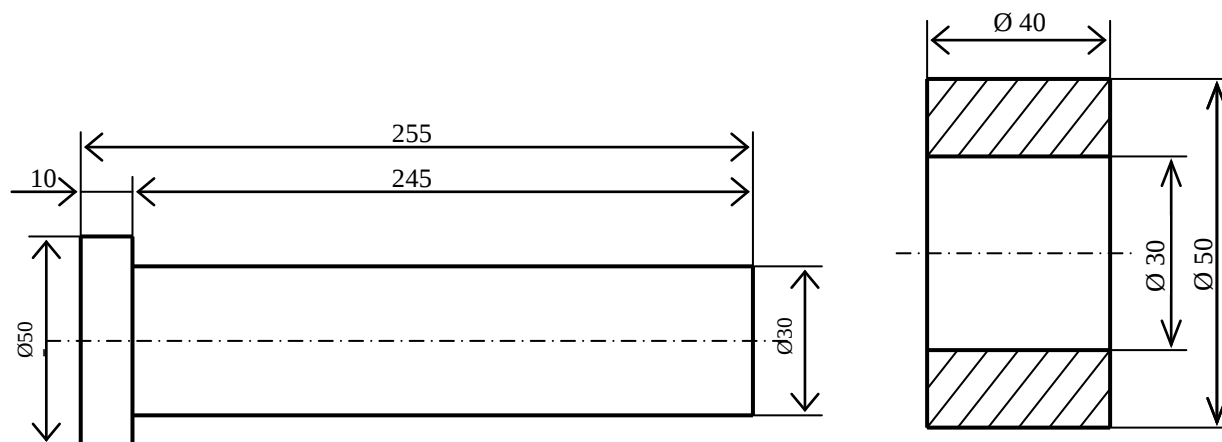


Рис.1 - Загальний вигляд досліджувального зразка

Насоси такого типу належать до числа найбільш відповідальних допоміжних машин теплових електричних станцій. Особливі умови роботи насоса вимагають, щоб усі деталі ротора, поряд із надійним закріпленням їх проти впливу робочого середовища, мали б ще й можливість вільного теплового розширення. Для цього необхідно точно витримувати осьові розміри. Ротор являє собою багатoelementне з'єднання, що складається з вала та послідовно насаджених на нього шість робочих коліс з нержавіючої сталі. Посадка коліс на вал здійснюється з натягом. Загальний вигляд ротора в зборі наведено на рис.2.

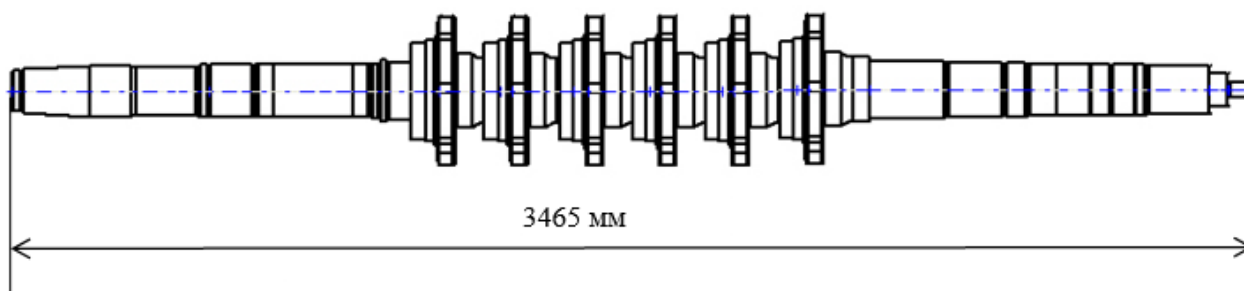


Рис. 2 - Ротор живильного насосу

Усі деталі великогабаритні - внутрішній діаметр колеса ротора становить 164,8 мм; ширина посадкової поверхні колеса ротора - 195 мм; сумарна довжина вала - 3465 мм. Діаметр посадкової поверхні по довжині вала становить - 1272.

Складання ротора здійснюється за допомогою індукційного нагріву, що зумовлено низкою переваг: можливість програмувати параметри нагріву виробу; унеможливлення перегріву лопаток до небезпечних температур, які призводять до знеміцнення матеріалу; одержання поверхні, що сполучається, без подряпин і деформацій; підвищення продуктивності праці. Недоліками такої збірки є витримування розмірної точності за рахунок лінійних розширень матеріалів унаслідок впливу температури.

Розрахунок складального розмірного ланцюга передбачає отримання зазору між торцями колеса і маточини розвантажувального диска певного розміру. Для цього на підставі креслення "Ротор. Складальне креслення ПН 1500-350" було побудовано схему розмірної одиниці (рис.3). Розмір A_1 – складова що становить зменшувальну ланку, дорівнює відстані між торцем першого колеса і торцем ступені вала;

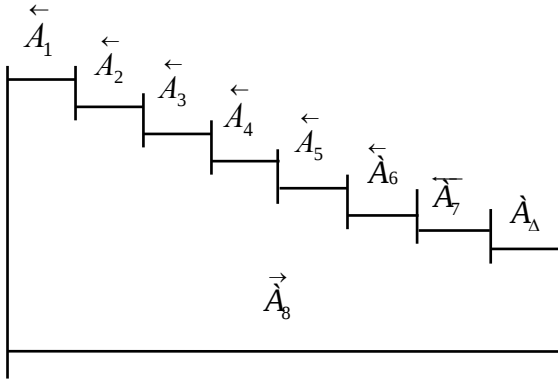


Рис. 3 - Схема розмірного ланцюга складальної одиниці

розміри $A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ – складові зменшувальні ланки складального розмірного ланцюга, які мають значення довжини посадкової поверхні коліс; A_8 – складова що становить збільшувальну ланку, яка має значення загальної довжини між торцями першого колеса і розвантажувального диска; A_1 – замикальна ланка, яка має значення відстані між торцями останнього колеса ротора і розвантажувального диска.

Оскільки виробництво з виготовлення роторів є дрібносерійним, і кількість ланок розмірного ланцюга перевищує чотири, розв'язання поставленої задачі реалізували

способом імовірнісного підсумовування.

Виконали розв'язання прямої задачі. Зі службового призначення механізму випливає, що мінімальний зазор між торцем останнього колеса ротора та торцем розвантажувального диска має становити 0,4 мм, а максимальний 0,6 мм. Отже, поле допуску на зазор дорівнюватиме:

$$\delta_{\Delta} = \Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}} = 0,6 - 0,4 = 0,2 \text{ мм.}$$

Координата середини поля допуску замикаючої ланки:

$$\Delta_{O_{\Delta}} = (\Delta_{B_{\Delta}} + \Delta_{H_{\Delta}}) / 2 = (0,6 + 0,4) / 2 = 0,5 \text{ мм.}$$

Розв'язання прямої задачі зводимо в таблицю 2.

Для складових ланок у графу 1 занесли номер складової ланки; у графу 2 - її характер; у графу 3 - номінальний розмір. У графу 4 внесли значення квадратів одиниць допусків усіх складових ланок, виходячи із заданого номінального розміру кожної ланки.

У графі 5 визначили кількість одиниць допуску за формулою

$$a = \frac{\delta_{\Delta}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} i_i^2}}, \quad (1)$$

де i_i - одиниця допуску i -ої складової ланки.

Квалітет усіх ланок розмірного ланцюга, окрім однієї за вибором (у цьому випадку залишили ланку A_8), визначили за величиною a і записали в графу 6.

Далі значення допусків розмірів складових ланок, крім однієї, визначили за ГОСТ 24643-81, виходячи з величини номінального розміру (графа 3) і квалітету (графа 6), і внесли в графи 7 і 8. Половину поля допуску замикаючої ланки і складових ланок визначили за формулами:

$$\frac{\delta_{\Delta}}{2} = \frac{\Delta_{B_{\Delta}} - \Delta_{H_{\Delta}}}{2}, \quad \frac{\delta_i}{2} = \frac{\Delta_{B_i} - \Delta_{H_i}}{2}.$$

Отримані дані занесли в графу 9, піднесли до квадрата і записали в графу 10. Половину поля допуску складової ланки, що залишилася, визначили за виразом:

$$\frac{\delta_x}{2} = \sqrt{\left(\frac{\delta_\Delta}{2}\right)^2 - \sum_{i=1}^{(m-1)-1} \left(\frac{\delta_i}{2}\right)^2 \xi^2},$$

де ξ - передавальне відношення, яке залежно від виду розмірного ланцюга може мати різний зміст і значення. Так, у цьому випадку для лінійного ланцюга для збільшувальних складових ланок передавальне відношення дорівнює одиниці, для зменшувальних складових ланок передавальне відношення дорівнює мінус одиниця.

Потім визначили координати середин полів допусків усіх складових ланок, крім однієї

$$\Delta_{O_i} = (\Delta_{B_i} + \Delta_{H_i})$$

Отримані значення записали в графу 11, де наприкінці підсумували окремі координати середин полів допусків ланок, що збільшують $\Delta_{o_{\hat{a}}}$ і зменшують $\Delta_{o_{\hat{a}}}$. Координату середини поля допуску складової ланки, що залишилася, визначили за виразом

$$\Delta_{o_x} = \left(\Delta_{o_\Delta} + \sum_{i=1}^{m-1} \Delta_{o_{\hat{a}}} \right) - \sum_{i=1}^{(m-1)-1} \Delta_{o_{\hat{a}}}.$$

Граничні відхилення складової ланки, що залишилася, визначили як

$$\Delta_{B_x} = \Delta_{o_x} + 0,5\delta_x, \Delta_{H_x} = \Delta_{o_x} - 0,5\delta_x$$

і записали в решту графів.

Виконали розв'язання зворотної задачі. Для цього визначили номінальне значення замикальної ланки без урахування лінійного розширення матеріалу і його граничні відхилення.

$$A_\Delta = \sum_{i=1}^n \xi_{A_i} A_i = -102 + (-195) \cdot 6 + 1272 = -1272 + 1272 = 0.$$

$$\Delta_{O_\Delta} = \left(\sum_1^m \Delta_{B_i} - \sum_1^n \Delta_{H_i} \right) \pm K_i \sqrt{\sum_1^{m+n} \left(\frac{T_i}{2} \right)^2},$$

$$\Delta_{B_\Delta} = (743 - 243) + 100 = 600 \text{ мкм},$$

$$\Delta_{H_\Delta} = (743 - 243) - 100 = 400 \text{ мкм}.$$

Далі для визначення точності складання знайшли коефіцієнт ризику і значення відсотка ризику

$$t = \frac{0,5T_\Delta}{\sqrt{\sum_1^{m+n} \lambda_i^2 \left(\frac{T_i}{2} \right)^2}} = \frac{100}{\sqrt{81+864+166}} = \frac{100}{33,3} \approx 3.$$

У цьому випадку для $t=3$, відсоток ризику становить 0,27 відсотка. Отже, допуски складових ланок перебувають у межах економічної точності, складання буде виконуватися з повною взаємозамінністю.

Визначимо номінальне значення замикаючої ланки розмірного ланцюга з урахуванням лінійного розширення матеріалу.

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \left(\xi_{A_i} A_i - \left(\beta_{BTi} l_i T_{BTi} + \Delta_{o_i} \right) \right) = -102 + (-192,9) \cdot 6 + 1272 = -1259,4 + 1272 = 12,6 \text{ мм.}$$

Наступним етапом є виконання складання ротора живильного насоса та визначення величини зазору між торцями останнього колеса і розвантажувального диска у виробничих умовах за допомогою додаткових технологічних операцій і без них.

Таблиця 2 - Розрахунок розмірного ланцюга складальної одиниці

№ Ланки	Характеристика ланки	Номінальний розмір, мм	Одиниця допуску в квадраті	Кількість одиниць допуску в квадраті	Квалітет	Граничне відхилення мкм		Половина поля допуску, мкм	Половина поля допуску в квадраті, мкм	Координата середини поля допуску, мкм
						верхнє	нижнє			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
-	Замикаюча					600	400	100	10000	500
1	Зменшуюча	102	4,709	26,9	8	54	0	27	729	27
2	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
3	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
4	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
5	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
6	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
7	Зменшуюча	195	8,410		8	72	0	36	1296	36
8	Збільшуюча	1272				782	704	38,67	1495	743
	Всього:		55,169							

Висновки

Дослідження з визначення величини замикаючої ланки під час розрахунку складальних розмірних ланцюгів з урахуванням впливу температурних зазорів показали, що результат розрахунку номінального значення замикаючої ланки не відповідає поставленому завданню, порівнюючи з отриманими результатами під час розрахунку без урахування впливу температурних зазорів. Однак практичне виконання складання ротора живильного насоса типу СВІТ-340-1000 ЛМЗ з урахуванням впливу температурних зазорів дає змогу підвищити точність складання в осьовому напрямку на (5-13) % і зменшити величину зазору між торцями колеса ротора і розвантажувального диска на (6-10) % без використання додаткового технологічного обладнання.

Список використаних джерел:

1. Визначення похибки процесів шліфування та швидкісного фрезерування з урахуванням статичної та динамічної невідповідності / В. Кальченко, В. Кальченко, С. Цибуля, Є. Сахно // Технічні науки та технології. 2020. № 3(21). С. 7278. DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-72-78
2. Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки / В. Ю. Денисюк, В. П. Симонюк, Ю. С. Лапченко, Б. І. Новосад // Перспективні технології та прилади. 2020. №16. С. 38-47. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2020-16-6.
3. Дослідження процесів обробки деталей при ударно-імпульсному навантаженні вібробункера / В. Ю. Денисюк, В. П. Симонюк, Ю. С. Лапченко, О. Л. Кайдик, В. В. Сташенчук // Перспективні технології та прилади. 2021. 18. С. 43 50. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2021-18-6.

4. Кривчик Л. С. Удосконалення технології термічної обробки пресового інструменту для пресування нержавіючих труб / Л. С. Кривчик, Т. С. Хохлова, В. Л. Пінчук // *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2019. № (5-6). С. 47-56. DOI: 10.34185/0543-5749.2019-5-6-47-56.
5. Новіков В. Визначення умов підвищення якості механічної обробки за температурним критерієм / В. Новіков, І. Полянський // *Перспективні технології та прилади*. 2020. № 17. С. 99-106. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2020-17-15.
6. Розроблення хімічного складу сталі та режиму термічної обробки залізничних коліс для експлуатації в легких умовах гальмування за високих навантажень на вісь / О. Бабаченко, Г. Кононенко, Р. Подольський, О. Сафронова // *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 1(96). С. 916. DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240422.9.837.
7. Дослідження структури та властивостей низьколегованої маловуглецевої сталі з ферито-бейнітною структурою після термічного зміцнення та наступного відпуску / Л. М. Дейнеко, А. Ю. Борисенко, А. О. Тараненко, Т. О. Зайцева, Н. С. Романова // *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 1. С. 33-46. DOI: 10.34185/0543-5749.2020-1-33-46.
8. Винник В. Аналіз методів обробки криволінійних поверхонь кулачків розподільних валів орієнтованим інструментом / В. Винник // *Технічні науки та технології*. 2019. № 4(18). С. 74-84. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.
9. Шорнікова, С. Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю / С. Шорнікова // *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2022. № 5. С. 1320. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.5.2.
10. Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів / Є. Пуховський, В. Фролов, В. Приходько, Ю. Бецо // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*. 2023. № 4. С. 92103. DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.
11. Зенкін А. Особливості створення верстатів для складання з'єднань з термодією / А. Зенкін, І. Оборський, Ю. Остапук // *Технологія і техніка друкарства*. 2012. С. 5359. DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.
12. Технологія машинобудування / А. С. Зенкін, В. Д. Каразей, Є. О. Гобатюк, М. П. Мазур. — Львів : Новий світ, 2000, 2009. — 358 с.
13. Метод віртуального базування деталей з формою, наближеною до форми заготовок / С. І. Планковський, Є. В. Цегельник, В. Б. Минтук, С. М. Задорожний, В. В. Комбаров // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 4. С. 7482. DOI: 10.32620/aktt.2020.4.09.
14. Григор'єва Н. С. Прогнозування розвитку комп'ютерно-інтегрованого складального виробництва приладобудування / Н. С. Григор'єва, І. В. Марчук, В. А. Шабайкович // *Перспективні технології та прилади*. 2022. Вип. 20. С. 3237. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.
15. Пасічник В. А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / В. А. Пасічник ; Нац. техн. ун-т України «КПІ». — Київ, 2009. 412 с.
16. Точність координувати отворів малого діаметру з напрямком різального інструменту / В. М. Бурдейна, Г. С. Грінченко, М. Артюх, А. Р. Тріщ // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2021. № 2. С. 914. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02>
17. Алгоритм проектування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ / Г. С. Грінченко, О. Теслов, М. С. Козлов, О. О. Марченко, С. О. Захаров, Є. В. Герасимов // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* Харків, 2022. Вип. 29. С. 50-61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61

References:

1. Kalchenko, V, Kalchenko, V, Tsybulia, S & Sakhno Ye (2020), 'Vyznachennia pokhybky protsesiv shlifuvannia ta shvydkisnoho frezeruvannia z urakhuvanniam statychnoi ta dynamichnoi nevrivnovazhenosti' [*Determination of the error of grinding and high-speed milling processes considering static and dynamic unbalance*], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. No 3(21), Pp. 72-78, DOI: 10.25140/2411-5363-2020-3(21)-72-78
2. Denysiuk, VI, Symoniuk, VP, Lapchenko, YuS & Novosad, BI (2020), 'Metrolohichne zabezpechennia tochnosti pryladiv aktyvnoho kontroliu v protsesi obrobky' [*Metrological support for the accuracy of active control devices in the machining process*], *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, no 16, Pp. 38-47, DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2020-16-6.
3. Denysiuk, VI, Symoniuk, VP, Lapchenko, YuS, Kaidyk, OL & Stashenchuk, VV (2021), 'Doslidzhennia protsesiv obrobky detalei pry udarno-impulsnomu navantazhenni vibrobunkera' [*Research of part machining processes under impact-impulse loading in a vibrating bunker*], *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, no 18, Pp. 43-50, DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2021-18-6.
4. Kryvchuk, LS, Khokhlova, TS & Pinchuk, VL (2019), 'Udoskonalennia tekhnolohii termichnoi obrobky presovoho instrumentu dlia presuvannia nerzhaviiuchykh trub' [*Improvement of the thermal treatment technology for*

the pressing tool used in stainless steel tube pressing], *Metallurhiina ta hirnychorudna promyslovist*, no 5-6, Pp. 47-56, DOI: 10.34185/0543-5749.2019-5-6-47-56.

5. Novikov, V, Polianskyi, I (2020), 'Vyznachennia umov pidvyshchennia yakosti mekhanichnoi obrobky za temperaturnym kryteriiem' [Determination of conditions for enhancing the quality of mechanical processing based on temperature criteria], *Perspektyvni tekhnologii ta prylady*, no 17, Pp. 99-106, DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2020-17-15.

6. Babachenko, O, Kononenko, H, Podolskyi, R & Safronova, O, (2022), 'Rozroblennia khimichnoho skladu stali ta rezhymu termichnoi obrobky zaliznychnykh kolis dlia ekspluatatsii v lehkykh umovakh halmuvannia za vysokikh navantazhen na vis' [Development of the chemical composition of steel and thermal treatment regime for railway wheels to operate under light braking conditions with high axle loads], *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, no 1, Pp. 9-16, DOI:10.30838/J.PMHTM.2413.240422.9.837.

7. Deineko, LM, Borysenko, AY, Taranenko, AO, Zaitseva, TO, & Romanova, NS (2020), 'Doslidzhennia struktury ta vlastyvoستي nyzkolehovanoi malovuhletsevoi stali z feryto-beinitnoiu strukturoiu pislia termichnoho zmitsnennia ta nastupnoho vidpusku' [Study of the structure and properties of low-alloy low-carbon steel with ferrite bainite structure after thermal strengthening and subsequent tempering], *Metallurhiina ta hirnychorudna promyslovist*, no 1, Pp. 33-46, DOI: 10.34185/0543-5749.2020-1-33-46.

8. Vynnyk, V (2019), 'Analiz metodiv obrobky kryvoliniinykh poverkhon kulachkiv rozpodilnykh valiv oriientovanykh instrumentom' [Analysis of methods for machining cam surfaces of distribution shafts using oriented tools], *Tekhnichni nauky ta tekhnologii*, no 4(18), Pp. 74-84, DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.

9. Shornikova, S (2022), 'Shorstkist poverkhni yak odna iz osnovnykh heometrychnykh kharakterystyk yakosti poverkhni detalei. metody ta zasoby kontroliu' [Surface roughness as one of the primary geometric characteristics of surface quality in components. Methods and means of control], *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky*, no 5, Pp. 13-20, DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.5.2.

10. Pukhovskiy, Ye, Frolov, V, Prykhodko, V & Betsko, Yu (2023), 'Tekhnologichni problemy vyhotovlennia korpusnykh detalei khimichnykh mashyn ta aparativ' [Technological challenges in manufacturing casing components for chemical machinery and apparatus], *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv*, iss 4, Pp. 92-103, DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.

11. Zenkin, A, Oborskyi, I & Ostapuk, Yu (2012), 'Osoblyvosti stvorennia verstativ dlia skladannia ziednan z termodiiei' [Features of creating machines for assembling connections with thermal effect], *Tekhnologhiia i tekhnika drukarstva*, iss 53-59, DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.

12. Zenkin, AC, Karazei, VD, Hobatiuk, YeO & Mazur, MP (2009), *Tekhnologhiia mashynobuduvannia [Mechanical Engineering Technology]*, Novyi svit_2000, Lviv

13. Plankovskiy, SI, Tsehelnik, YeV, Myntiuk, VB, Zadorozhnyi, SM & Kombarov, VV (2020), 'Metod virtualnoho bazuvannia detalei z formoiu, nablyzhenoiu do formy zahotovok' [The method of virtual alignment of parts with a shape approximating that of blanks], *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnologhiia*, no 4, Pp. 74-82, DOI: 10.32620/akt.2020.4.09.

14. Hryhorieva, NS, Marchuk, IV & Shabaikovych, VA (2022), 'Prohnozuvannia rozvytku kompiuterno-intehrovanoho skladalnoho vyrobnytstva pryladobuduvannia' [Forecasting the development of computer-integrated assembly production in instrument making], *Perspektyvni tekhnologii ta prylady*, iss. 20, Pp. 32-37, DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.

15. Pasichnyk, VA (2009), 'Osnovy kompiuterno-intehrovanoho mekhanoskladalnoho vyrobnytstva' [Fundamentals of computer-integrated mechanical assembly production], *Dokt. tekhn. nauk thesis*, Natsionalnyi tekhnichniyi universytet Ukrainy "KPI", Kiev

16. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR (2021), 'Tochnist koordynuvaty otvoriv maloho diametru z napriamkom rizalnoho instrumentu' [The precision of coordinating small diameter holes with the direction of the cutting tool], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnologhiakh, no 2, Pp. 9-14, DOI <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02>

17. Hrinchenko, HS, Teslov, O, Kozlov, MS, Marchenko, OO, Zakharov, SO & Herasymov, YeV (2022), 'Alhorytm proektuvannia system avtomatychnoho upravlinnia tochnistiu mekhanichnoi obrobky na verstatakh z ChPU' [Algorithm for designing automatic precision control systems for mechanical processing on CNC machines], *Mashynobuduvannia*, no 29, Pp. 50-61, DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61

Стаття надійшла до редакції 15 серпня 2023 року

КВАЛІМЕТРИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ ІНДИКАТОРІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ: ЦІЛЬ 8. ГІДНА ПРАЦЯ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ЗРОСТАННЯ

© Грінченко Г.С., Негодов С.С., Мазорчук К.К., Грінченко В.В., Тріщ Ю.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hhrinchenko@uipa.edu.ua кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Негодов Сергій Станіславович (Nehodov Serhii): ORCID: 0000-0003-3561-6924; e-mail: titansv2017@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мазорчук Катерина Костянтинівна (Mazorchuk Kateryna): ORCID: 0009-0001-0769-4872; ekaterina.mazorchuk@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Грінченко Володимир Вікторович (Hrinchenko Volodymyr): ORCID: 0000-0001-5721-9175; e-mail: green2015@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Тріщ Юлія Віталіївна (Trishch Yuliia): ORCID: 0000-0001-5730-5903; e-mail: trishch@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті розглянуто завдання та показники сталого розвитку на прикладі Цілі 8 "Гідна праця та економічне зростання" як на міжнародному, так і національному рівні, та виявлено кілька незворотних питань, які виникають при оцінюванні прогресу досягнення сталого розвитку. У період пандемії COVID-19 помітний зниження показників на обох рівнях - міжнародному та національному, що ускладнює об'єктивну оцінку досягнення цілей сталого розвитку. Зокрема на національному рівні, існує падіння показників, частково зумовлене російською агресією, що додатково ускладнює завдання оцінювання прогресу. Ці специфічні особливості національної економіки вимагають перегляду набору показників сталого розвитку на національному рівні. Пропонується розглянути включення показників, пов'язаних з рівнем міграції, для більш точного врахування ситуації. Важливою системною проблемою в оцінюванні прогресу сталого розвитку є різноманітність показників, їхня відмінність на глобальному та національному рівнях, а також різний характер. Наприклад, деякі показники на міжнародному рівні можуть бути позитивними (такі як рівень зайнятості населення, освіченість населення), або негативними (наприклад, рівень безробіття, рівень неформальної зайнятості). Для оцінювання показників сталого розвитку було запропоновано використовувати кваліметричний метод, що вже успішно використовується для оцінки якості продукції. Цей метод дозволяє здійснити комплексну оцінку прогресу сталого розвитку, враховуючи різноманітність показників.

Ключові слова: кваліметричне оцінювання, індикатори сталого розвитку, гідна праця, економічне зростання

Hrinchenko H., Nehodov S., Mazorchuk K., Hrinchenko V., Trishch Yu. "Qualitative assessment of sustainable development indicators: Goal 8. Decent work and economic growth"

The article reviews the targets and indicators of sustainable development on the example of Goal 8 "Decent Work and Economic Growth" at both the international and national levels. It identifies several irreversible issues that arise when assessing progress towards sustainable

development. During the COVID-19 pandemic, there has been a decline in indicators at both the international and national levels, making it difficult to objectively assess the achievement of the Sustainable Development Goals. In particular, at the national level, there is a drop in indicators, partly due to Russian aggression, which further complicates the task of assessing progress. These specific features of the national economy require a revision of the set of sustainable development indicators at the national level. It is proposed to consider the inclusion of indicators related to the level of migration to more accurately take into account the situation. An important systemic problem in assessing the progress of sustainable development is the diversity of indicators, their differences at the global and national levels, and their different nature. For example, some indicators at the international level can be positive (such as the employment rate, the level of education of the population) or negative (such as the unemployment rate, the level of informal employment). To assess sustainable development indicators, it was proposed to use the qualimetric method, which has already been successfully used to assess product quality. This method allows for a comprehensive assessment of sustainable development progress, taking into account a variety of indicators.

Keywords: qualimetric assessment, indicators of sustainable development, decent work, economic growth

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

Глобальний сталий розвиток забезпечується у трьох аспектах, а саме: соціальним прогресом, економічним зростанням і відповідальністю за навколишнє середовище. Ці три напрямки закладені в 17 Цілях сталого розвитку (ЦСР), досягнення яких є важливим завданням для кожної країни у сучасному світі. Для оцінювання прогресу у досягненні ЦСР у 2016 році створено документ "Доповідь Міжурядової групи експертів з індикаторів Цілей сталого розвитку", який містить індикатори сталого розвитку для цілей та завдань, та має на меті представити весь спектр репрезентативних даних щодо оцінювання прогресу виконання сталого розвитку по кожній країні та світу в цілому[1]. У доповіді надано огляд виконаної роботи Міжвідомчою групою експертів, яка займалася розробкою глобальної системи показників для цілей і завдань, передбачених Порядком денним у галузі сталого розвитку на період до 2030 року. Пропозиція враховує показники для всіх Цілей і завдань, при цьому деякі з них вже мають чітке визначення, тоді як інші потребують додаткової роботи над ними. Універсальні показники ЦСР були розроблені в рамках Організації Об'єднаних Націй і включають широкий спектр сфер, таких як подолання бідності, якісна освіта, здоров'я, гендерна рівність, гідна праця, економічне зростання, захист довкілля тощо. Ці показники допомагають відстежувати прогрес та порівнювати досягнення між різними країнами та регіонами.

Кожна країна в свою чергу адаптує цілі та завдання сталого розвитку, а відповідно і індикатори, які використовуються для оцінки прогресу з урахуванням специфіки національного розвитку. Так, в Україні у 2016 році було внесено 86 завдань національного сталого розвитку та 172 індикатори для подальшого моніторингу. Ці індикатори були розроблені на основі розрахунково-прогнозої роботи, використовуючи сценарні підходи для визначення довгострокових напрямків розвитку країни. Оцінка прогресу досягнення Цілей сталого розвитку має стати постійним процесом, що включає звітування, оновлення показників та аналіз результатів.

Звісно, що для оцінювання наприклад, окремої сфери діяльності, або підприємства чи організації, універсальні глобальні показники сталого розвитку можна адаптувати до власних потреб. Головне, в даному випадку знайти правильний підхід до оцінювання прогресу у досягненні ЦСР, адже показники різномірні та мають різний характер. Належна оцінка прогресу є важливим етапом у досягненні Цілей сталого розвитку. Для цього потрібні показники та кваліметричні підходи, які дозволять об'єктивно виміряти зміни та визначити, наскільки успішно впроваджуються стратегії сталого розвитку.

Отже метою статті є аналіз показників сталого розвитку на різних рівнях та розробка універсальних кваліметричних підходів оцінювання індикаторів сталого розвитку, що враховують різноманітність показників, особливості значущості окремих показників для певної країни чи сфери та можуть використовуватись для оцінювання прогресу у досягненні цілей сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Концептуальні аспекти кваліметричної оцінки висвітлені в багатьох дослідженнях вчених як в Україні, так і за кордоном. Автори [2-7] досліджували питання розробки кваліметричних підходів для оцінювання об'єктів різної природи. В їхніх роботах були запропоновані підходи до кваліметричного оцінювання якості економічних, виробничих та освітніх процесів, оцінки ризиків отримання продукції низької якості на виробництві за допомогою функції щільності ймовірності випадкової величини. Також були розглянуті аспекти оцінки ризику захворювання, зокрема ймовірність зараження Ковід-19, використовуючи підходи кваліметричної оцінки.

Автори робіт [8-11] досліджували застосування кваліметричних методів для оцінювання якості в енергетичних системах. В їхніх дослідженнях було показано, що ці методи використовують багатофакторний аналіз, який враховує вплив різних чинників на якість функціонування окремих елементів та систем енергетичних об'єктів. Авторами продемонстровано, що такий підхід є ефективним механізмом для комплексного оцінювання різноманітних параметрів, прогнозування подальшої експлуатації та прийняття науково-обґрунтованих рішень щодо проведення планових та позапланових робіт для забезпечення якості функціонування. Такий підхід дозволяє урахувувати вплив різних факторів на якість енергетичних систем, допомагає виявляти проблемні аспекти та визначати пріоритети для покращення ефективності та надійності енергетичних об'єктів. Використання кваліметричних методів сприяє більш точному прогнозуванню та плануванню робіт з підтримки якості функціонування енергетичних систем.

Часто кваліметричні методи використовуються для оцінювання якості освіти, як одного з критеріїв сталого розвитку. Про це свідчать роботи [12-16], в яких розглядається технологія побудови факторно-критеріальних моделей. У дослідженні [12] був представлений підхід, що базується на числовій інтерпретації результатів, отриманих за допомогою методу експертних оцінок. Автори цієї роботи розробили набір критеріїв для оцінювання якості електронних ресурсів, який може зручно використовуватись для оцінки їхньої якості під час проведення дистанційних курсів. Пропонується використовувати цей інструментарій для ранжування інших ресурсів навчального процесу за якісними ознаками. Наприклад, використання цього підходу може допомогти в оцінюванні якості навчального відеоконтенту. Таким чином, метод експертних оцінок, використовуючи запропонований набір критеріїв, може стати ефективним інструментом для оцінювання та ранжування різних електронних ресурсів, що використовуються в навчальному процесі.

В роботах [14-16] було використано кваліметричний підхід для оцінювання якості опанування окремих компетентностей студентами з метою визначення їх успішності у формуванні цих компетентностей. Автори вказують, що застосування кваліметричного моніторингу для оцінювання якості освітніх процесів є ефективним інструментом управління. Цей метод дозволяє моніторити розвиток ресурсів освітнього процесу та, з використанням статистичних методів, визначати, як їхні зміни впливають на остаточні результати освіти.

Аналогічно, автори робіт [15, 16] пропонують використовувати результати оцінювання з метою управління та вдосконалення якості освітнього середовища. Це дозволяє ідентифікувати проблемні аспекти, здійснювати моніторинг ефективності заходів та розробляти стратегії для поліпшення якості освітнього процесу. Застосування

кваліметричного підходу в цьому контексті сприяє забезпеченню систематичного оцінювання, контролю та покращення якості освіти.

Вирішення питань кваліметричної оцінки в контексті досягнення Цілей сталого розвитку наведено в роботах [17-20]. У дослідженнях [17-19], було розроблено всесторонню систему показників з використанням великих обсягів даних з відкритих джерел. Також була створена ANN-модель для ефективної оцінки загального прогресу в досягненні Цілей сталого розвитку (ЦСР) для міст різних розмірів. В даному дослідженні враховано порівняння рівнів сталості міст з різною кількістю населення, просторовим розташуванням та рівнем доходів. Ці методи були розроблені на основі аналізу Індексу Цілей сталого розвитку для міст Китаю та можуть бути адаптовані для застосування в інших країнах з необхідними корекціями.

У роботі [20] автори висувають методологію для оцінки сталості промислового водного циклу, що базується на розрахунку показників та індексів. Мета полягає в створенні синтетичного, зрозумілого та специфічного інструменту для кваліметричної оцінки водних ресурсів. Дослідження ґрунтується на географічно прив'язаних даних щодо доступності води та її використання в галузях, і це було визначено для італійських вододільних басейнів. Запропонована методологія допомагає оцінити ефективність заходів управління річковими басейнами з метою досягнення цілей сталого розвитку.

У дослідженнях [21-22], автори пропонують оцінку сталого розвитку на основі створеної моделі зрілості для окремих громад або регіонів. Ця модель базується на системі, що включає аналіз територіального контексту (фаза визначення обсягу), оцінку зрілості (фаза розробки) та застосування тематичних досліджень (фаза оцінювання). Оцінка охоплює всі плани, програми та ініціативи, необхідні для визначення цілей і стратегій покращення, що або всі аспекти сталого розвитку. Це дозволяє забезпечувати динамічне управління сталим розвитком на місцевому рівні та надає громадам можливість визначати стратегії сталого розвитку. Оцінка зрілості в цій моделі відіграє ключову роль, зв'язуючи поточну ситуацію з покращенням у майбутньому. Запропоновану модель можна використовувати як засіб для самооцінки, як план дій для поліпшення практик в сфері сталого розвитку, а також як інструмент бенчмаркінгу для оцінки та порівняння стандартів і найкращих практик серед організацій та ланцюгів постачання.

Метою роботи є аналіз існуючих підходів до визначення індикаторів сталого розвитку та методів їх оцінювання для подальшого удосконалення.

Виклад основного матеріалу

Кваліметричні підходи до оцінювання індикаторів сталого розвитку базуються на використанні якісних методів збору та аналізу даних. Вони спрямовані на отримання глибокого розуміння сутності індикаторів сталого розвитку, їхнього взаємозв'язку та впливу на соціально-економічні процеси.

Основні принципи кваліметричних підходів до оцінювання індикаторів сталого розвитку включають:

- Концептуальна ясність: визначення чітких та однозначних теоретичних концепцій та визначень індикаторів сталого розвитку.
- Включення зацікавлених сторін: залучення різних зацікавлених сторін, таких як урядові органи, громадські організації та академічна спільнота, у процес розробки та оцінки індикаторів сталого розвитку.
- Контекстуальний аналіз: врахування особливостей соціо-еколого-економічного контексту, в якому використовуються індикатори сталого розвитку.

- Інтегрований підхід: використання комплексного підходу до оцінювання, який враховує взаємозв'язок між різними індикаторами та їхнім впливом на сталий розвиток.
- Квалітативний аналіз: застосування якісних методів збору та аналізу даних, таких як експертні оцінки, фокус-групи, інтерв'ю та глибинні інтерв'ю.
- Застосування методів ранжування: використання методів ранжування для порівняння різних індикаторів сталого розвитку та визначення їхньої важливості.
- Зворотний зв'язок та вдосконалення: врахування результатів оцінки індикаторів сталого розвитку для покращення методології та дальшого вдосконалення системи оцінки.

Ці підходи дозволяють забезпечити глибше розуміння індикаторів сталого розвитку та їхнього впливу на суспільство, економіку та навколишнє середовище. Вони можуть служити основою для прийняття рішень та розробки політик, спрямованих на досягнення сталого розвитку.

Оцінювання індикаторів сталого розвитку має свої особливості, оскільки вимагає комплексного підходу та врахування різних аспектів сталого розвитку. Процеси, що оцінюються при цьому мають різну природу, та показники якості мають різні одиниці вимірювання та різні оптимальні значення. На даний час існує безліч індикаторів, які можуть бути використані для вимірювання сталого розвитку. Однак, немає однозначної кількості індикаторів, які були офіційно прийняті або визнані загальноприйнятими. Вибір конкретних індикаторів залежить від контексту, цілей оцінювання та потреб користувачів.

У 2015 році була прийнята "Повна система індикаторів сталого розвитку" (The Sustainable Development Goals Indicators) Організацією Об'єднаних Націй, яка включає 17 цілей сталого розвитку з 169 підцілей [1]. Кожна ціль має набір відповідних індикаторів, які використовуються для відстеження прогресу у досягненні цих цілей. Однак, інші організації та дослідницькі групи також розробляють свої власні системи індикаторів сталого розвитку відповідно до своїх потреб і пріоритетів.

Отже, кількість індикаторів сталого розвитку може варіюватись і залежить від конкретного фреймворку або системи, яку обирають для оцінювання сталого розвитку.

Розглянемо окремі завдання та індикатори сталого розвитку для певної Цілі. В якості прикладу було обрано Ціль 8 «Гідна праця та економічне зростання». Питаннями забезпечення гідної праці та економічного зростання на регіональному, національному та міжнародному рівні займаються різні організації, як і для забезпечення моніторингу, збору даних, удосконаленням та управління прогресом для всіх Цілей сталого розвитку. Так, на міжнародному рівні, питаннями сталого розвитку Цілі 8 опікується Міжнародна організація праці (МОП), Міжнародна організація з міграції (МОМ), Світова організація торгівлі (СОТ), Міжнародний валютний фонд (МВФ), група Світового банку та Конференція ООН з торгівлі та розвитку (ЮНКТАД). Україна, є повноправним член міжнародних організацій, та на національному рівні має державні органи та структури, що займаються питаннями сталого розвитку у напрямку забезпечення гідної праці та економічного розвитку, а саме: Міністерство економіки, Міністерство інфраструктури, Міністерство закордонних справ, Міністерство освіти і науки, Державна служба зайнятості та Державна міграційна служба. Регіональними питаннями у сфері гідної праці та економічного розвитку займаються відповідні служби та департаменти, які співпрацюють з органами та структурами, як національного рівня, так і міжнародними організаціями. Кожна з цих організацій, органів та структур займається моніторингом, збором та обробкою статистичних даних, які репрезентують прямо або опосередковано прогрес у досягненні завдань Цілі 8 сталого розвитку. Порівняємо завдання та індикатори сталого розвитку на різних рівнях (табл. 1).

Таблиця 1 – Глобальні та Національні завдання та відповідні індикатори сталого розвитку для ЦСР 8

Глобальні[1]		Національні[23]	
Завдання	Індикатор	Завдання	Індикатор
1	2	3	4
8.1 Підтримувати економічне зростання на душу населення зростання на душу населення відповідно до національних обставин і, зокрема, на рівні щонайменше 7% зростання валового внутрішнього валового внутрішнього продукту на рік у найменш розвинених країнах	8.1.1 Річні темпи зростання реального ВВП на душу населення	8.1. Забезпечити стійке зростання ВВП на основі модернізації виробництва, розвитку інновацій, підвищення експортного потенціалу, виводу на зовнішні ринки продукції з високою часткою доданої вартості	8.1.1. Індекс фізичного обсягу ВВП (середньорічний), %
			8.1.2. Частка валового нагромадження основного капіталу у ВВП, %
			8.1.3. Частка експорту товарів з використанням у виробництві технологій високого та середньовисокого рівня в загальному обсязі експорту товарів, % (групи «Продукція хімічної та пов'язаних з нею галузей промисловості», «Полімерні матеріали, пластмаси та вироби з них», «Машини, обладнання та механізми; електротехнічне обладнання», «Засоби наземного транспорту, літальні апарати, плавучі засоби», 90-та підгрупа групи «Прилади та апарати оптичні, фотографічні» (згідно з УКТЗЕД))
8.2 Досягти вищих рівнів економічної продуктивності через диверсифікації, технологічної модернізації та інновацій, у тому числі шляхом зосередження на секторах з високою доданою вартістю та трудомістких галузях	8.2.1 Річні темпи зростання реального ВВП на одну зайняту особу		8.1.4. Місце України у рейтингу за Глобальним інноваційним індексом
8.3 Сприяти впровадженню політики, орієнтованої на розвиток, яка підтримує виробничу діяльність, створення гідних робочих місць, підприємництво, творчість та інновації, а також заохочує формалізацію та зростання мікро-, малих і середніх підприємств, у тому числі через доступ до фінансових послуг.	8.3.1 Частка неформальної зайнятості в загальній зайнятості, за секторами та статтю	8.3. Підвищити рівень зайнятості населення	8.3.1. Рівень зайнятості населення віком 20–64 роки, %

Продовження табл. 1

1	2	3	4
8.4 Поступово підвищувати до 2030 року глобальну ефективність використання ресурсів у споживанні та виробництві та намагатися відокремити економічне зростання від погіршення стану довкілля, відповідно до 10-річних рамок програм зі сталого споживання та виробництва, разом з розвиненими країнами, які беруть на себе ці зобов'язання	8.4.1/12.2.1 Матеріальний слід на душу населення та матеріальний слід на ВВП	8.2. Підвищувати ефективність виробництва на засадах сталого розвитку та розвитку високотехнологічних конкурентних виробництв	8.2.1. Коефіцієнт віддачі основних засобів
	8.4.2 Внутрішнє матеріальне споживання на душу населення та внутрішнє матеріальне споживання на ВВП		8.2.2. Темп зростання продуктивності праці, %
			8.2.3. Матеріалоємність ВВП (відношення обсягу проміжних витрат із таблиць «витрати-випуск» видів діяльності, які виробляють матеріальну продукцію, до загального обсягу ВВП)
8.5 До 2030 року досягти повної та продуктивної зайнятості та гідної праці для всіх жінок і чоловіків, у тому числі для молоді та осіб з інвалідністю, та рівну оплату за працю рівної цінності	8.5.1 Середня погодинна заробітна плата працівників за статтю, віком, професією та особами з інвалідністю		
	8.5.2 Рівень безробіття за статтю, віком та особами з інвалідністю		
8.6 До 2020 року суттєво зменшити частку молоді, яка не працює, не здобуває освіти або не навчається	8.6.1 Частка молоді (віком 15-24 роки), яка не навчається, не працює і не проходить професійну підготовку	8.4. Скоротити частку молоді, яка не працює, не навчається і не набуває професійних навичок	8.4.1. Частка молоді, яка не працює, не навчається і не набуває професійних навичок, у загальній чисельності осіб віком 15–24 роки, %
8.7 Вжити негайних та ефективних заходів для викорінювання примусової праці, покласти край сучасному рабству та торгівлі людьми, а також забезпечити заборону та ліквідації найгірших форм дитячої праці, включаючи вербування та використання дітей-солдатів, і до 2025 року викоринити дитячу працю в усіх її формах	8.7.1 Частка та кількість дітей віком 5-17 років, залучених до дитячої праці, за статтю та віком дітей		
8.8 Захищати трудові права та сприяти безпечне та захищене робоче та сприяти створенню безпечних умов праці для всіх працівників, в тому числі трудящих-мігрантів, зокрема жінок-мігрантів, та тих, хто з нестабільною зайнятістю	8.8.1 Нещасні випадки зі смертельними та не смертельними наслідками на виробництві на 100 000 працівників, за статтю та статусом мігранта	8.5. Сприяти забезпеченню надійних та безпечних умов праці для всіх працюючих, зокрема шляхом застосування інноваційних технологій у сфері охорони праці та промислової безпеки	8.5.1. Кількість потерпілих від нещасних випадків на виробництві, які призвели до втрати працездатності на 1 робочий день чи більше, % до рівня 2015 року

Продовження табл. 1

1	2	3	4
	8.8.2 Рівень національного дотримання трудових прав (свобода об'єднання та колективних переговорів) на основі даних Міжнародної організації праці (МОП) текстові джерела та національне законодавство, за статтю та статусом мігранта		8.5.2. Кількість загиблих від нещасних випадків на виробництві, % до рівня 2015 року 8.5.3. Частка працівників, зайнятих на роботах зі шкідливими умовами праці, у загальнообліковій кількості штатних працівників, %
8.9 До 2030 року розробити та впровадити політику для просування сталого туризму, який створює робочі місця та просуває місцеву культуру та продукцію	8.9.1 Прямий ВВП від туризму як частка від загального ВВП та темпи зростання		
8.10 Посилити спроможність вітчизняних фінансових установ для заохочувати та розширювати доступ до банківських, страхових та фінансових послуг для всіх	8.10.1 (а) Кількість відділень комерційних банків на 100 000 дорослого населення та (b) кількість банкоматів на 100 000 дорослого населення	8.6. Створити інституційні та фінансові можливості для самореалізації потенціалу економічно активної частини населення та розвитку креативної економіки	8.6.1. Кількість зайнятих працівників у суб'єктів середнього та малого підприємництва, млн осіб
	8.10.2 Частка дорослого населення (15 років і старше), яке має рахунок у банку або іншій фінансовій установі або у постачальника послуг мобільних грошей		8.6.2. Частка доданої вартості за витратами виробництва суб'єктів середнього та малого підприємництва, у % до загальної суми доданої вартості за витратами виробництва
			8.6.3. Частка малих та середніх підприємств, що мають зобов'язання за кредитом або кредитною лінією, в їх загальній кількості, %
			8.6.4. Місце України у рейтингу легкості ведення бізнесу Doing Business
8.а Збільшити підтримку в рамках ініціативи "Допомога в інтересах торгівлі" для країн, що розвиваються, зокрема найменш розвинених країн, у тому числі через Розширену інтегровану рамочну програму технічної допомоги у сфері торгівлі для найменш найменш розвинутих країнам	8.а.1 Зобов'язання та виплати за програмою "Допомога для торгівлі".		

Закінчення табл. 1

1	2	3	4
8.b До 2020 року розробити та розробити та ввести в дію глобальну стратегію щодо зайнятості молоді та впровадити Глобальний пакт про робочі місця Міжнародної організації праці	8.b.1 Існування розробленої та впровадженої національної стратегії молодіжної зайнятості, як окремої стратегії або як частини національної стратегії зайнятості		

Дивлячись на світові показники та прогрес досягнення сталого розвитку в напрямку забезпечення гідної праці та економічного зростання, можна зробити висновки, що світова економіка повільно відновлюється, хоча активність залишається нижчою за допандемічний рівень. Після зростання приблизно на 1,4% у 2019 році світовий реальний ВВП на душу населення різко знизився на 4,4% у 2020 році. За оцінками, світовий реальний ВВП на душу населення відновиться з темпами зростання 4,4% у 2021 році і, за прогнозами, знову збільшиться на 3,0% у 2022 році та 2,5% у 2023 році. Реальний ВВП найменш розвинених країн збільшився на 5,0% у 2019 році і не продемонстрував зростання у 2020 році через збої, спричинені пандемією.

Пандемія COVID-19 призвела до безпрецедентних і нестабільних змін у рівні продуктивності праці. У період з 2015 по 2019 рік виробіток на одного працівника у світі зростав у середньому на 1,6 відсотка на рік. У 2020 році пандемія призвела до різкого скорочення як виробництва, так і зайнятості, а виробіток на одного працівника знизився на 0,6%, що стало першим таким зниженням з 2009 року. Глобальна продуктивність праці різко зросла у 2021 році, збільшившись на 3,2%.

Оскільки криза COVID-19 вплинула на всі сектори економіки, заходи стримування та обмеження мобільності перешкоджали перерозподілу робочої сили в бік неформальної зайнятості, яка раніше була ключовим механізмом регулювання ринку праці в багатьох регіонах. Перерозподілу робочої сили до неформальної зайнятості, яка раніше була ключовим механізмом регулювання ринку праці в багатьох регіонах. Замість того, щоб стати безробітними або перейти до неформальної зайнятості, як це було під час попередніх криз, звільнені працівники та самозайняті працівники залишали робочу силу. Непропорційний вплив на неформальних працівників відобразився у зниженні рівня неформальної зайнятості в деяких країнах у розпал кризи. Це, в свою чергу, поставило неформальних працівників та їхні сім'ї у край нестабільне становище, наражаючись на раптову втрату доходу і зіткнулися з підвищеним ризиком потрапляння в бідність.

У 2021 році глобальний рівень безробіття дещо знизився до 6,2%, що все ще значно перевищує допандемічний показник у 5,4%. За прогнозами МОП, безробіття залишатиметься вищим за рівень 2019 року щонайменше до 2023 року. Тим часом рівень безробіття недооцінює вплив кризи на повну зайнятість, оскільки багато хто з тих, хто залишив ринок праці, вже не повернулися. Він також не відображає скорочення робочого часу для тих, хто залишився працювати. У 2021 році було втрачено 4,3 відсотка робочого часу у світі порівняно з четвертим кварталом 2019 року, що еквівалентно дефіциту 125 мільйонів робочих місць з повною зайнятістю (за умови 48-годинного робочого тижня)[24].

Ці показники вказують на необхідність удосконалення кваліметричних підходів для оцінювання прогресу. Однією з обраною методологій розрахунку, яку використовують Єврокомісія [25] і ЮНІСЕФ [26], є урахування напрямку руху індикатора - досягнення мети чи зворотний процес, а також швидкість цього руху. Цей індекс обчислюється на короткостроковий тренд (оснований на зміні показника протягом останніх п'яти років) і вимагає наявності даних, принаймні за останні 3 роки. Проте значні коливання показників,

особливо протягом останніх трьох років, у такому випадку ускладнюють об'єктивну оцінку прогресу (чи регресу) у досягненні цілей.

Розрахунок тенденцій для показників з кількісними цілями базується на обчисленні загального річного темпу приросту (CAGR). Для таких індикаторів, фактичне значення темпу приросту порівнюється з теоретичним, який потрібен для досягнення мети у визначений цільовий рік. Цей метод включає у себе три послідовні кроки:

1) визначення фактичного темпу прогресу, шляхом оцінки приросту показника сталого розвитку:

$$CAGR_a = \left(\frac{y_t}{y_0} \right)^{\frac{1}{t-t_0}} - 1,$$

де t_0 – початковий рік;

t – рік звітування;

y_0 – значення показника в початковому році;

y – значення показника за кінцевий рік.

2) розрахунок прогнозу (теоретичного) темпу прогресу для досягнення мети:

$$CAGR_r = \left(\frac{x_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{t_1-t_0}} - 1,$$

де t_0 – початковий рік;

t_1 – прогнозований рік;

y_0 – значення показника в початковому році;

x_1 – необхідне значення показника в прогнозованому році.

3) розрахунок співвідношення теоретичного і прогнозованого темпів прогресу:

$$\frac{Ra}{r} = \frac{\left(\frac{y_t}{y_0} \right)^{\frac{1}{t-t_0}} - 1}{\left(\frac{x_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{t_1-t_0}} - 1}$$

Разом з тим, ми розуміємо, що оцінка за таких умов і прогнозування росту вкрай не якісна. Особливої це стосується кваліметричної оцінки прогресу у досягненні цілі сталого розвитку в Україні, тому що тут виникає кілька питань, які можуть вплинути на загальні показники та якісну оцінку.

По-перше, Україна, як і весь світ зіткнулась зі змінами в економічній ситуації, продуктивності праці та зайнятості населення у зв'язку з пандемією COVID-19. Згідно зі статистичними даними, в Україні був відмічений спад економіки. В реальних виразах, валовий внутрішній продукт (ВВП) України у 2020 році зменшився на 4%, після попереднього зростання упродовж 2016–2019 років. Номінальний ВВП склав 4 трильйони 194,1 мільярда гривень, а ВВП на душу населення становив 100,47 тисячі гривень. За даними Державної служби статистики, у першому кварталі 2022 року ВВП України скоротився на 15,1% порівняно з відповідним періодом 2021 року. Продовжуючи цю тенденцію, реальний ВВП України в першому кварталі 2023 року зменшився на 10,5% в порівнянні з першим кварталом 2022 року. Попередньо, у четвертому кварталі 2022 року спостерігалось падіння на 31,4%, у третьому - на 30,6%, у другому - на 36,9%, а у першому кварталі 2022 року - на 14,9%. За даними Державної служби статистики України, за 9 місяців 2020 року кількість зайнятого населення у віці від 15 до 70 років порівняно з відповідним періодом 2019 року зменшилася на 627 тисяч осіб і складала 16,0 млн осіб. Рівень зайнятості у цій групі віків знизився з 58,3% до 56,5%. Рівень безробіття у віковій категорії 15-70 років згідно з методологією Міжнародної організації праці збільшився з 8,1% до 9,3% від робочої сили.

По-друге, у наслідок повномасштабного вторгнення росії в Україну, спостерігається значний спад економіки, а деякі дані просто відсутні для статистичного аналізу. Діяльність малого та мікробізнесу, які забезпечують робочі місця для значної частини працездатного населення, стала більш складною. Станом на початок листопада 2022 року, 12,4% малих та 8% мікропідприємств повністю припинили свою діяльність, а ще 24,6% та 22,5% майже зупинилися, а 33,2% та 31,9% функціонували лише частково. Ця ситуація негативно позначилася на індексі активності бізнесу, який знизився до 35%. Згідно з офіційною статистикою станом на 1 січня 2023 року, статус безробітного мав 186,5 тис. осіб, при наявності 21,2 тис. вакансій. Це означає, що на одну вакансію припадало приблизно дев'ять офіційно зареєстрованих роботодавцем шукачів роботи. Тим не менше, кількість офіційно зареєстрованих безробітних зменшилася через тих, хто виїхав за кордон або був мобілізований до Збройних Сил України. Додатково, не всі безробітні мають реєстрацію в державній службі зайнятості. За оцінками Міністерства економіки, на початку 2023 року кількість безробітних становила 2,6 млн осіб, а за даними Національного банку України - від 4,2 до 4,8 млн осіб.

По-третє, виникають складнощі з порівнянням репрезентативних даних України та інших країн. Так, деякі індикатори сталого розвитку просто не релевантні для України, такі як індикатори 8.a.1 та 8.b.1, або завдання, щодо рівності оплати праці, не зважаючи на стат'ю (в Україні єдині ставки та оклади для всіх статей). Окремі національні показники корелюються з міжнародними, але мають різний характер. Так, наприклад, міжнародний індикатор сталого розвитку «8.3.1 Частка неформальної зайнятості в загальній зайнятості, за секторами та статтю», що має спрямованість зменшуватись (що менше, то краще) та відповідний індикатор сталого розвитку «8.3.1. Рівень зайнятості населення віком 20–64 роки, %», який має спрямований на збільшення (чим більше, тим краще). Деякі репрезентативні дані стосовно прогресу сталого розвитку моніторяться в Україні, але не представлені серед індикаторів сталого розвитку національного рівня: міграційні питання, рівень безробіття, неформальна занятість, тощо, які стали в сучасних умовах дуже актуальними для України. Окремою проблемою є різномірність показників, як серед міжнародних індикаторів сталого розвитку, так і національного рівня (проценти, кількість осіб, коефіцієнт, грошові одиниці, місце в рейтингу). І знов таки, якщо грошові одиниці (долари та гривні), можна перевести та порівняти, то репрезентативність інших даних можна оцінити, лише прогрес з часом, та не можливо оцінити комплексний показник прогресу за даною ціллю.

Отже, для оцінки індикаторів сталого розвитку України пропонується розрахунок комплексних показників на основі одиничних показників сталого розвитку, які мають різну розмірність. Кваліметричну оцінку проводять після розрахунку відносних показників Ind_{ij} за формулами

$$Ind_{ij} = \frac{IND_{ij}}{IND_{i6}}, \quad (1)$$

$$Ind_{ij} = \frac{IND_{i6}}{IND_{ij}}, \quad (2)$$

де IND_{ij} – значення i -го показника сталого розвитку;

IND_{i6} – базове значення i -го показника сталого розвитку.

Базове значення показника індикатора сталого розвитку – це найкраще значення показника сталого розвитку (100%, максимальне значення на глобальному рівні, 0, значення що поставлено в якості гранично допустимого). Формулу (1) використовують для визначення позитивних показників сталого розвитку, а формулу (2) – для негативних показників сталого розвитку. Позитивним вважають показник сталого розвитку, якщо його чисельне значення

збільшується за умови прогресу досягнення цілі, а негативним – якщо чисельне значення зменшується.

Середні зважені показники сталого розвитку при реалізації комплексного методу оцінювання використовують у тих випадках, коли важко визначити головний показник і його функціональну залежність від одиничних показників, як в нашому випадку.

Середні зважені комплексні показники індикаторів сталого розвитку j -го варіанта визначають за такими формулами:

середній зважений арифметичний показник якості

$$\overline{IND}_j = \frac{\sum_{i=1}^n Ind_{ij} g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (3)$$

де g_i – коефіцієнт вагомості;

середній зважений геометричний показник якості

$$\overline{\overline{IND}}_j = \left(\prod_{i=1}^n Ind_{ij}^{g_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i}}; \quad (4)$$

середній зважений гармонічний показник якості

$$\approx IND_j = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{Ind_{ij}}}. \quad (5)$$

Якщо має місце обмеження $\sum_{i=1}^n g_i = 1$, то середні зважені комплексні показники сталого розвитку j -го варіанта визначають за такими формулами:

середній зважений арифметичний показник індикатора сталого розвитку

$$\overline{IND}_j = \sum_{i=1}^n Ind_{ij} g_i; \quad (6)$$

середній зважений геометричний показник індикатора сталого розвитку

$$\overline{\overline{IND}}_j = \prod_{i=1}^n Ind_{ij}^{g_i}; \quad (7)$$

середній зважений гармонічний показник сталого розвитку

$$\approx IND_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{Ind_{ij}}}. \quad (8)$$

В основу цього методу покладено відомий метод оцінювання якості продукції на основі комплексного показника її якості. Комплексне оцінювання дозволяє отримати узагальнену оцінку – комплексний показник якості, який певним чином об'єднує основні, найбільш значущі властивості, в нашому випадку індикатори сталого розвитку. Комплексний показник якості може пов'язуватися з одиничними показниками якості через функціональні залежності, що відбивають об'єктивні закони природи, а може бути й деякою комбінацією одиничних показників.

Висновки

Проаналізувавши завдання та індикатори сталого розвитку на прикладі Цілі 8 «Гідна праця та економічне зростання» на міжнародному та національному рівні виявлено ряд проблемних питань, які виникають при оцінюванні прогресу досягнення сталого розвитку. Виявлено, значний спад показників у період пандемії COVID-19 на міжнародному рівні та національному, що ускладнює об'єктивне оцінювання досягнення цілей сталого розвитку. Разом з тим, на національному рівні, досі спостерігається спад показників, або відсутність їх у результаті російської агресії, що ускладнює завдання оцінювання прогресу. Означені вище особливості національної економіки потребують перегляду набору індикаторів сталого розвитку для національного рівня, наприклад, з метою врахування рівня міграції. Системною проблемою оцінювання прогресу сталого розвитку виявилась різномірність показників; не відповідність індикаторів сталого розвитку на глобальному та національному рівні; а також, різний характер індикаторів сталого розвитку, тобто на міжнародному рівні деякі індикатори є позитивними (рівень зайнятості населення, кількість населення, що має освіту) та негативними (рівень безробіття, рівень неформальної зайнятості), в свою чергу перелік індикаторів для Цілі 8 мають тільки позитивний характер. Для оцінювання індикаторів сталого розвитку запропоновано кваліметричний метод оцінювання, що застосовується для оцінки показників якості продукції та дає можливість комплексно оцінити прогрес сталого розвитку з урахуванням різномірності показників.

Список використаних джерел:

1. Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators, E/CN.3/2016/2 / United Nations statistical commission. – Access mode : <https://unstats.un.org/unsd/> (Last accesses 11.09.23)
2. Qualimetric method of assessing risks of low quality products / Trishch R., Nechuyviter O., Dyadyura K., Vasilevskyi O., Tsykhanovska I., Yakovlev M. // *MM Science Journal*. – 2021. – October. – Pp. 4769-4774. doi:10.17973/MMSJ.2021_10_2021030
3. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case / Ginevičius, R., Trišć, R., Remeikienė, R., Zielińska, A., & Strikaitė-Latušinskaja, G. // *Journal of International Studies*. – 2022. – № 15(1). – Pp. 230-249. doi:10.14254/2071-8330.2022/15-1/15
4. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series / Trishch R., Gorbenko E., Dotsenko N., Kim N., Kiporenko G. // *Східно-європейський журнал передових технологій*. – 2016. – Вип. 4(3-82). – С. 18-24. doi:10.15587/1729-4061.2016.75503
5. Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017, 2019 / Trishch R., Maletska O., Hrinchenko H., Artiukh S., Burdeina V., Antonenko N. // *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*. – 2019. – Pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019539>.
6. Applying fuzzy logic to assessment of latent economic features / Yankovyi O., Tsimoshynska O., Kazancoglu Y., Kotlubai V., Filipishyna L. // *Advances in Soft Computing Applications*. – 2023. – Pp. 1-22.
7. Evaluating the effectiveness of enterprises' digital transformation by fuzzy logic / Kaminsky O., Yereshko J., Vdovenko N., Bocharov M., & Kazancoglu Y. // *Advances in Soft Computing Applications*. – 2023. – Pp. 75-90.
8. Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів / Буданов П. Ф., Грінченко Г. С., Нечуйвітер О. П., Бойко Т. Г., Цихановська І. В. // *Машинобудування : зб наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2022. – Вип. 30. – С. 73–84. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84
9. Методологічні підходи для оцінювання якості багатопараметричних об'єктів енергетики / Буданов П. Ф., Грінченко Г. С., Нечуйвітер О. П., Цихановська І. В. // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04>
10. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant / Hrinchenko H., Trishch R., Burdeina V., Chelysheva S. // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2019. – № 120(2). – Pp. 104-110.
11. 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. Green Energy and Technology* / Koval, V., Olczak, P. (eds). – Springer, Cham. – 2023. – Pp. 1-17. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1

12. Video content creation technology to provide web resources for distance learning and evaluation, using qualimetric tools / Bachiieva L., Koeberlein-Kerler J., Kovalenko D., Yelnykova H., Karpova L. – 2023. doi:10.1007/978-3-031-26190-9_33
13. Yelnykova H. Qualimetric approach for new valedological disciplines assessing in ukrainian electrical and power engineering education / H. Yelnykova // Paper presented at the Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES. – 2022. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005712
14. Yelnykova H. Adaptive Technologies for Training of Specialists / H. Yelnykova, Z. Ryabova // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2021. – № 1031. – Pp. 012-125. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012125>, (last accessed 2022/09/11).
15. Кіпоренко Г. С. Імплементція європейських стандартів вищої освіти при викладанні технічних дисциплін для майбутніх інженерів-педагогів / Г. С. Кіпоренко // Проблеми інженерно-педагогічної освіти : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2016. – Вип. 52-53. – С. 45-53.
16. Implementation in the educational process a systematic approach to teaching the principles of sustainable development / Hrinchenko H., Kovtun O., Mykolaiko V. // Modern approaches to ensuring sustainable development : monograph / The University of Technology in Katowice Press. – Katowice, 2023. – Pp. 33-42. DOI: 10.54264/M020
17. Qualimetric approaches to assessing sustainable development indicators / H. Hrinchenko, R. Trishch, V. Mykolaiko, O. Kovtun // E3S Web Conf. – 2023. – Vol. 408. – 01013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340801013>
18. Assessing progress towards sustainable development over space and time / Xu Z., Chau S. N., Chen X. et al. // Nature. – 2020. – no 577. – Pp. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1846-3>
19. Evenness is important in assessing progress towards sustainable development goals / Yali Liu et al. // National Science Review. – 2021. – № 8. – Pp. 238. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa238>
20. Methodology for a preliminary assessment of water use sustainability in industries at sub-basin level / G. Sabia, D. Mattioli, M. Langone, L. Petta // Journal of Environmental Management. – 2023. – № 343. – Pp. 118-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118163>.
21. Toniolo S. Improving sustainability in communities: Linking the local scale to the concept of sustainable development / S. Toniolo, Ch. Pieretto, D. Camana // Environmental Impact Assessment Review. – 2023. – № 101. – Pp. 107-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107126>
22. Correia E. Supply Chain Sustainability: A Model to Assess the Maturity Level / Correia E., Garrido-Azevedo S., Carvalho H. // Systems. – 2023. – № 11. – P. 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020098>
23. Національна доповідь "Цілі сталого розвитку: Україна" / М-во економіч. розвитку і торгівлі України. – 2017. – Режим доступу : <http://bit.ly/SDGsUkraine> (дата звернення 11.09.23)
24. Progress towards the Sustainable Development Goals (E/2022/55) : Report of the Secretary-General / United Nations statistical commission. – 2022. – Access mode : https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2022/E_2022_55_Statistical_Annex_I_and_II.pdf (Last accessed 11.09.23)
25. Monitoring Report on Progress towards the SDGs in an EU Context / European Union. – 2017.
26. Progress for Every Child in the SDG Era: Methodology Note. – 2018. – Access mode : <https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2018/03/Progress-for-Every-Child-ANNEXES-03.06.2018.pdf>. (Last accessed 11.09.23).

References:

1. United Nations statistical commission 2016, *Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators*, E/CN.3/2016/2, viewed 11 September 2023 <<https://unstats.un.org/unsd/>>
2. Trishch, R, Nechuviter, O, Dyadyura, K, Vasilevskyi, O, Tsykhanovska, I & Yakovlev, M 2021, 'Qualimetric method of assessing risks of low quality products', *MM Science Journal*, October, Pp. 4769-4774. doi:10.17973/MMSJ.2021_10_2021030
3. Ginevičius, R, Trišć, R, Remeikienė, R, Zielińska, A & Strikaitė-Latušinskaja, G 2022, 'Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case', *Journal of International Studies*, no 15(1), Pp. 230-249. doi:10.14254/2071-8330.2022/15-1/15
4. Trishch, R, Gorbenko, E, Dotsenko, N, Kim, N & Kiporenko, G 2016, 'Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series' *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no 4(3-82), Pp. 18-24. doi:10.15587/1729-4061.2016.75503
5. Trishch, R, Maletska, O, Hrinchenko, H, Artiukh, S, Burdeina, V & Antonenko, N 2019, 'Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017', *IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL)*, Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAOL46282.2019.9019539>.
6. Yankovyi, O, Tsimoshynska, O, Kazancoglu, Y, Kotlubai, V & Filipishyna, L 2023, 'Applying fuzzy logic to assessment of latent economic features', *Advances in Soft Computing Applications*, Pp. 1–22.
7. Kaminsky, O, Yershko, J, Vdovenko, N, Bocharov, M & Kazancoglu, Y 2023, 'Evaluating the effectiveness of enterprises' digital transformation by fuzzy logic', *Advances in Soft Computing Applications*, Pp. 75–90.

8. Budanov, PF, Hrinchenko, HS, Nechuiviter, OP, Boiko, TH & Tsykhanovska, IV 2022, 'Zastosuvannia metodiv kvalimetrii dlia otsinky kompleksnykh pokaznykiv yakosti bahatoparmetrychnykh ob'ektiv' [*The application of qualimetric methods for assessing comprehensive quality indicators of multiparametric objects*], *Mashynobuduvannia*, iss 30, Pp. 73 -84. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84
9. Budanov, PF, Hrinchenko, HS, Nechuiviter, OP & Tsykhanovska, IV 2023, 'Metodolohichni pidkhody dlia otsiniuvannia yakosti bahatoparmetrychnykh ob'ektiv enerhetyky' [*Methodological approaches for evaluating the quality of multiparametric energy objects*], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh, no 1, Pp. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04>
10. Hrinchenko, H, Trisch, R, Burdeina, V & Chelysheva, S 2019, 'Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant', *Problems of Atomic Science and Technology*, no 120(2), Pp. 104-110.
11. Hrinchenko, H, Kupriyanov, O, Khomenko, V, Khomenko, S & Kniazieva, V 2023, 'An Approach to Ensure Operational Safety for Renewable Energy Equipment' in: Koval, V., Olczak, P. (eds) *Circular Economy for Renewable Energy. Green Energy and Technology*, Springer, Cham, Pp. 1-17, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
12. Bachiieva, L, Koeberlein-Kerler, J, Kovalenko, D, Yelnykova, H & Karpova, L 2023, *Video content creation technology to provide web resources for distance learning and evaluation, using qualimetric tools*. doi:10.1007/978-3-031-26190-9_33
13. Yelnykova, H 2022, 'Qualimetric approach for new valeological disciplines assessing in ukrainian electrical and power engineering education' *Paper presented at the Proceedings of the 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022*. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005712
14. Yelnykova, H & Ryabova, Z 2021, 'Adaptive Technologies for Training of Specialists', *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* No 1031, Pp. 012-125. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1031/1/012125>.
15. Kiporenko, HS 2016, 'Implementatsiia yevropeyskykh standartiv vyshchoi osvity pry vykladanni tekhnichnykh dystsyplin dlia maibutnikh inzheneriv-pedahohiv' [*Implementation of European standards in higher education when teaching technical disciplines for future engineering educators*], *Problemy inzhenerno-pedahohichnoi osvity*, iss 52-53, Pp. 45-53.
16. Hrinchenko, H, Kovtun, O & Mykolaiko, V 2023, 'Implementation in the educational process a systematic approach to teaching the principles of sustainable development' in *The University of Technology in Katowice Press Modern approaches to ensuring sustainable development*", Pp. 33-42. DOI: 10.54264/M020
17. Hrinchenko, H, Trishch, R, Mykolaiko, V & Kovtun, O 2023, 'Qualimetric approaches to assessing sustainable development indicators' *E3S Web Conf.*, Vol. 408, 01013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340801013>
18. Xu, Z, Chau, SN, Chen, X et al. 2020, 'Assessing progress towards sustainable development over space and time', *Nature*, iss 577, Pp. 74–78. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1846-3>
19. Yali L. et al. 2021, 'Evenness is important in assessing progress towards sustainable development goals', *National Science Review*, iss 8 (8), P. 238. DOI: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa238>
20. Sabia, G, Mattioli, D, Langone, M & Petta, L 2023, 'Methodology for a preliminary assessment of water use sustainability in industries at sub-basin level', *Journal of Environmental Management*, iss 343, Pp. 118-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118163>.
21. Toniolo, S, Pieretto, Ch & Camana, D 2023, 'Improving sustainability in communities: Linking the local scale to the concept of sustainable development', *Environmental Impact Assessment Review*, iss 101, Pp. 107-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2023.107126>
22. Correia, E, Garrido-Azevedo, S & Carvalho, H 2023, 'Supply Chain Sustainability: A Model to Assess the Maturity Level', *Systems*, iss 11, P. 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/systems11020098>
23. Ministerstvo ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy 2017, *Natsionalna dopovid "Tsili staloho rozvytku: Ukraina"* [*National Report "Sustainable Development Goals: Ukraine"*], viewed 11 September 2023 <<http://bit.ly/SDGsUkraine>>
24. United Nations statistical commission 2022, *Report of the Secretary-General: Progress towards the Sustainable Development Goals (E/2022/55)*, viewed 11 September 2023 <https://unstats.un.org/sdgs/files/report/2022/E_2022_55_Statistical_Annex_I_and_II.pdf>
25. European Union 2017, *Monitoring Report on Progress towards the SDGs in an EU Context*.
26. Progress for Every Child in the SDG Era: Methodology Note 2008, viewed 11 September 2023 <<https://data.unicef.org/wp-content/uploads/2018/03/Progress-for-Every-Child-ANNEXES-03.06.2018.pdf>>

Стаття надійшла до редакції 21 вересня 2023 року.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАСОСНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

© Крамаренко Ю.О., Дрозд В.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Крамаренко Юрій Олександрович (Kramarenko Yuriy): ORCID: 0009-0005-1937-9756; kramarenkouira@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Дрозд Володимир Анатолійович (Drozd Volodymyr): ORCID: 0009-0001-4335-7558; volodyadrozdz2296@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті намічені шляхи вирішення важливої та актуальної науково-технічної проблеми створення енергозберігаючих САУ технологічними об'єктами. Сформульовано вихідні наукові принципи, викладено загальну процедуру створення та реалізації енергозберігаючих САУ нагнітачів при частотно-дросельному управлінні. Наведені аналітичні залежності, які встановлюють залежності між основними параметрами насосної установки – тиском та об'ємною подачею та параметрами керуючого впливу – частотою обертання насоса та положенням регулюючої засувки та, таким чином, являють собою модель управління. Показано вирази, що визначають значення напорів, споживаної потужності та ККД у робочих точках. Отримано функцію залежності подачі в робочій точці насоса від двох регульованих параметрів – частоти обертання робочого колеса та положення регулюючої засувки. Показано, що на низьких частотах обертання насоса його напірна характеристика круто падає, однак при зміні подачі в межах $(0,7-1,1) Q_{\text{ном}}$, частотне регулювання забезпечує необхідний напір в умовах відкритої засувки. При створенні адекватних математичних моделей і виборі доцільного методу оптимізації, розглянутий підхід управління мінімуму енергетичних втрат може бути використаний при синтезі систем управління практично будь-якого енергетичного обладнання електростанцій. Показано, що наявність інших способів регулювання нагнітачів не обмежує можливості використання цього методу, але потребує уточнення математичних моделей та аналізу енергетичних характеристик. Запропонована система управління адаптивна, що дозволяє більш точно підтримувати необхідні характеристики технологічного процесу, знижуючи тим самим втрати енергії у нагнітачах, а й у основному енергетичному обладнанні ТЕС і АЕС.

Ключові слова: показники якості, нагнітальна установка, енергоблок, електростанція, енергозбереження.

Kramarenko Y., Drozd V. «Improving the quality of pump installations through the enhancement of control systems»

The article outlines approaches to solving the important scientific and technical problem of creating energy-saving control systems for technological objects. The initial scientific principles are formulated, the general procedure for the creation and implementation of energy-saving control systems for pumps with frequency-throttle control is presented. Analytical dependencies are presented, which establish relationships between the main parameters of the pumping system - pressure and volumetric flow rate, and control influence parameters - pump rotation frequency and position of the control valve, thus constituting a control model. Expressions defining the values of head, power consumption, and efficiency at operating points are shown. A function of the pump flow rate dependence

at the operating point on two adjustable parameters - the rotation frequency of the impeller and the position of the control valve - is obtained. It is shown that at low pump rotation frequencies, its head characteristic sharply decreases, however, with changes in flow rate within $(0.7-1.1) Q_{\text{nom}}$, frequency control provides the necessary head under conditions of an open valve. When creating adequate mathematical models and choosing a rational optimization method, the discussed approach to minimizing energy losses can be used in the synthesis of control systems for practically any power equipment of power plants. It is shown that the presence of other methods of pump regulation does not limit the possibilities of using this method, but requires clarification of mathematical models and analysis of energy characteristics. The proposed control system is adaptive, allowing for more accurate maintenance of the necessary technological process characteristics, thereby reducing energy losses in pumps, as well as in the main power equipment of thermal and nuclear power plants.

Keywords: quality indicators, pump installation, power unit, power plant, energy saving.

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

Підвищення якості нагнітальних установок шляхом зниження втрат енергії при її виробленні на електростанціях всіх типів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить зменшити собівартість електроенергії, підвищити енергоефективність роботи станцій, а також знизити негативний вплив теплових електростанцій на екологічну обстановку регіону, тобто. значно підвищити показники якості електростанції.

Витрата на власні потреби теплових та атомних електростанцій сягає 10% і значна частина втрат енергії йде на привід нагнітальних (насосних, вентиляторних) установок. Насосні установки ТЕС та АЕС є досить енергоємними елементами (на великих енергоблоках їхня споживана потужність становить 12-18 МВт). Так, потужність насосів, що обслуговують котлотурбінне обладнання (поживні, конденсатні, циркуляційні та інші) досягає 4% потужності, що виробляється енергоблоком. Параметри нагнітачів та їх енергоефективність впливають на техніко-економічні показники станції та забезпечують оптимальні режими роботи котла, турбіни, конденсатора та іншого енергетичного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зміна параметрів нагнітачів здійснюється системами автоматичного керування (САУ), що входять до загальної АСУ енергоблоку та станції. При цьому цілеспрямоване та ефективне управління, засноване на методах системного аналізу, математичного моделювання, технічної кібернетики, містить у собі, на системному рівні, значні резерви енерго- та ресурсозбереження, які можуть бути виявлені, використані та реалізовані на рівні окремих елементів, що входять до комплексної системи керування [1].

Один із принципів енергозберігаючого автоматизованого управління технологічними об'єктами докладно описаний у роботах [1, 2]. Для підвищення якості нагнітальних установок використовуються частотні приводи [3]. Питання оптимізації роботи нагнітальних установок відображені у [4–10]. У роботах [4–6] наведено дослідження ефективності роботи як одиночного насоса [6], так і двох насосів, що працюють паралельно [4, 5]. Показано методики вибору потужності насосів та їх характеристик при заданому значенні витрати. Однак питання вибору та підтримки оптимальних режимів роботи нагнітачів при зміні витрат у широкому діапазоні розкрито не повністю. У той час як ефективність роботи нагнітачів у широкому діапазоні подачі має велике практичне значення для ТЕС України, що працюють на змінних навантаженнях [5]. Перспективним напрямом підвищення ефективності нагнітальних установок є покращення їх конструктивних параметрів [7, 8], використання нових матеріалів [9] та удосконалення систем регулювання [10]. Поряд із цим у існуючій літературі відсутня науково-обґрунтована методика вибору оптимальних режимних параметрів нагнітальних установок електростанцій (при яких гарантовано забезпечується мінімум втрат енергії) у широкому діапазоні зміни навантажень.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою даної є розробка методології підвищення якості насосних установок при їх енергозберігаючому управлінні і доведення її до стадії програмної реалізації.

Виклад основного матеріалу

Енергоємність насосних установок визначається гідравлічною характеристикою мережі, яку вони працюють. У свою чергу характеристика мережі визначається необхідною подачею робочого середовища, а також геометричними параметрами мережі, коефіцієнтами місцевих та лінійних втрат та ін.

Як правило, витрата робочого середовища трубопроводом визначається потужністю споживача (парогенераторна установка, конденсатор та ін) або необхідністю підтримки протікання технологічних процесів (конденсаторопроводи, маслопроводи, дренажні трубопроводи та ін).

Векторну структурну схема нагнітальної установки можна подати у вигляді, як показано на рис. 1.

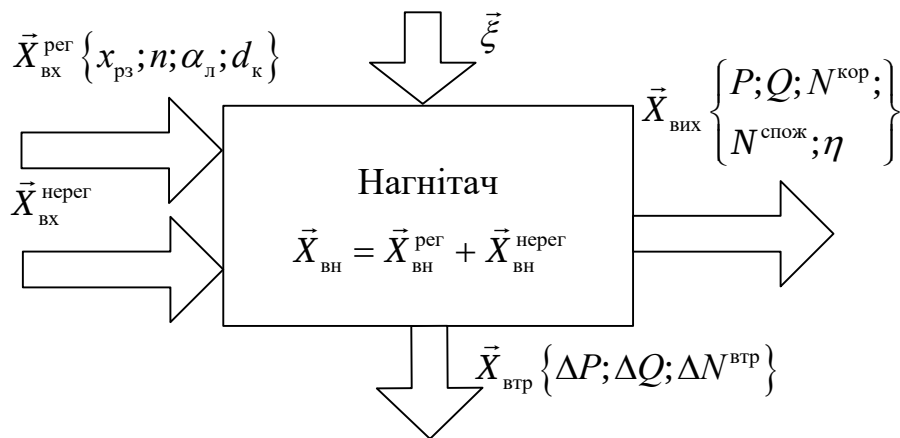


Рис. 1– Векторна структурна схема нагнітача

Вектор регульованих вхідних параметрів включає положення (переміщення) регулюючої засувки $x_{рз}$ та частоту обертання ротора насоса n . Ці параметри можуть бути змінені виконавчими механізмами САУ відповідно до того чи іншого алгоритму, який формується регулятором САУ.

Вектор вихідних параметрів включає значення тиску (P), та витрати (Q), створюваних насосним агрегатом, корисну ($N^{кор}$) і споживану ($N^{спож}$) потужність та ККД (η) насос.

Вектор внутрішніх параметрів $\vec{X}_{вн}$ включає конструктивні характеристики насосного агрегату та гідравлічної мережі (розміри та форми робочих коліс та лопат, довжини та діаметри трубопроводів, види, кількість та характеристики місцевих гідравлічних опорів).

Вектор зовнішніх збурень, $\vec{\xi}$ включає можливі зміни температури в процесі експлуатації та пов'язану з цим зміну фізичних властивостей робочої рідини (головним чином – в'язкості).

Виходячи із співвідношень, наведених у [2] будуються математичні моделі насоса:

Зв'язок між параметрами насоса та гідравлічної мережі:

$$P = \rho g h_r + (P_1 - P_0) + \frac{\rho}{2} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum G_m \right) \frac{V^2}{S^2} + \frac{\rho}{2} G_{рз} \frac{V^2}{S_{рз}^2}, \quad (1)$$

де h_r – геометрична висота підйому рідини;

$P_1 - P_0$ – тиск у напірному та всмоктувальному резервуарах;

P – щільність рідини;

λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (в автомобільній області, яка відповідає основним режимам роботи насоса, мало змінює своє значення, тобто може вважатися постійною величиною);
 l, d та S – наведені значення довжини і діаметра, та площі прохідного перерізу трубопроводів гідравлічної мережі;

$\sum G_m$ – сумарний коефіцієнт місцевих гідравлічних опорів у гідравлічній мережі;

G_{p3} – коефіцієнт місцевих гідравлічних опорів регулюючий засувки;

S_{p3} – площа прохідного перерізу регулюючої засувки, що є функцією її переміщення x_{p3} (або кута повороту φ_{p3}): $S_{p3} = K_{p3}^x x_{p3} = K_{p3}^\varphi \varphi_{p3}$

Взаємозв'язок між частотою обертання n , об'ємною подачею V та напором H насоса:

$$n = \left(\frac{60x}{\pi m m_0 R} \right)^{3/2} \frac{(Hg / \bar{H})^{3/4}}{\sqrt{V}}, \quad (2)$$

Модель вихідних параметрів:

$$\vec{x}_{\text{вих}} = f_{\text{вих}}(x_{p3}; n; \vec{x}_{\text{вн}}; \xi) \quad (3)$$

Модель (функція) енергетичних втрат:

$$\vec{x}_{\text{втр}} = f_{\text{втр}}(x_{p3}; n; \vec{x}_{\text{вн}}; \xi) \quad (4)$$

Модель (функція) керуючого впливу:

$$\vec{x}_{\text{вх}} = f_{\text{упр}}(\vec{x}_{\text{вих}}; \vec{x}_{\text{вн}}; \vec{x}_{\text{втр}}; \xi) \quad (5)$$

Модель фізичного процесу:

$$V^2 \frac{\rho}{2} \left[\left(\lambda \frac{l}{d} + \sum G_m \right) / S^2 + G_{p3} / S_{p3}^2 \right] = P - [\rho g h_r + (P_1 - P_0)] \quad (6)$$

Співвідношення (1) може бути подане у вигляді:

$$P = C_1 + V^2 \frac{\rho}{2} \left(C_2 + \frac{G_{p3}}{[S_{p3}(x_{p3})]^2} \right), \quad (7)$$

$$\text{або } P = C_1 + V^2 \left(C_3 + C_4 / [S_{p3}(x_{p3})]^2 \right)$$

де $C_1 = \rho g h_r + (P_1 - P_0)$;

$$C_2 = \lambda \frac{l}{d} + \sum G_m / S^2;$$

$$C_3 = \rho C_2 / 2; C_4 = \rho G_{p3} / 2$$

Тоді співвідношення (2) може бути записане так:

$$C_5 (C_6 P)^{0,75} V^{0,5} = n_n, \quad (8)$$

де $C_6 = (\rho \bar{H})^{-1}$.

Рівняння (7) і (8) встановлюють залежності між основними параметрами насосної установки – тиском P та об'ємною подачею V та параметрами керуючого впливу – частотою обертання насоса n_n та положенням регулюючої засувки x_{pz} і, таким чином, є модель управління.

Характеристика насосної установки, в якій працює насос, може бути подана у вигляді:

$$H_c = H_r + \frac{P_1 - P_0}{\rho g} + \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \left(\sum_{j=1}^m G_{mj} \right)_i \right] \frac{1}{S_i^2} \cdot \frac{Q^2}{2g}, \quad (9)$$

Якщо уявити значення коефіцієнтів гідравлічного тертя на ділянках середніми, характеристиками для даної ділянки постійними значеннями λ_{cpi} , то лінеаризована характеристика мережі може бути представлена у вигляді:

$$H_c = A_c Q + C_c. \quad (10)$$

Функція енергетичних втрат (втрат потужності) у нагнітачі в робочій точці може бути визначена таким чином:

$$\Delta N = N_{втр} = N_{спож} - N_{кор}, \quad (11)$$

де $N_{кор} = \rho g H_p \cdot Q_p$ – корисна потужність насоса.

Значення напорів, споживаної потужності та ККД у робочих точках визначаються відповідно до виразів:

$$\begin{cases} H_p = A_H Q_p + B_H n + C_H; \\ N_p = A_N Q_p + B_N n + C_N; \\ \eta_p = A_\eta Q_p + B_\eta n + C_\eta, \end{cases} \quad (12)$$

З врахуванням того, що $N_{втр}^p = \eta_p N_p$ (в робочій точці), функція (11) приходить до вигляду:

$$N_{втр}^p = (1 - \eta_p) N_p,$$

а функція втрат визначатиметься:

$$N_{втр}^p = (1 - A_\eta Q_p - B_\eta \cdot n - C_\eta) (A_N Q_p + B_N \cdot n + C_N), \quad (13)$$

або

$$N_{втр}^p = A_{Q_2} Q_p^2 + A_{n_2} \cdot n^2 + A_Q Q_p + A_n \cdot n + A_{Qn} Q_p \cdot n + C,$$

де коефіцієнти лінеаризації:

$$\begin{cases} A_{Q_2} = -A_\eta A_N \\ A_{n_2} = -B_\eta B_N \\ A_Q = (A_N - A_\eta C_N - C_\eta A_N) \\ A_n = (B_N - B_\eta C_N - C_\eta B_N) \\ A_{Qn} = -(A_\eta B_N + B_\eta A_N) \\ C = (1 - C_\eta) \cdot C_N \end{cases}.$$

Подача нагнітач (витрата середовища в робочій точці) Q_p є заданою величиною, що визначається технологічним режимом роботи об'єкта. Вона є функцією двох регульованих параметрів – частоти обертання робочого колеса та положення регулюючої засувки (фактично – і всієї гідравлічної характеристики мережі (9), (10)). При цьому, з урахуванням виділення положення регулюючої засувки (її коефіцієнта місцевого гідравлічного опору) як окремий регульований параметр, функція (9) може бути представлена у вигляді [2]:

$$H_c = H_p = H_{ct} \pm \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \sum_{j=1}^m G_{mj} \right] \frac{1}{S_i^2} \right\} Q_p^2 + 2gS_{p30}^2 \cdot G_{p3}(x_{p3}) Q_p^2, \quad (14)$$

де $H_{ct} = H_r + \frac{P_1 - P_0}{\rho g}$ – статична складова напору;

S_{p30} – максимальна площа (при повному відкритті) прохідного перерізу засувки.

Вираз (14) може бути приведений до вигляду:

$$H_p = H_{ct} + A_c Q_p^2 + A_{p3} x_{p3} Q_p^2, \quad (15)$$

де

$$A_c = \frac{1}{2g} \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \left(\sum_{j=1}^m G_{mj} \right) \right] \frac{1}{S_i^2};$$

$$A_{p3} = \frac{K_{Gx}^{p3}}{2gS_{p30}^2};$$

K_{Gx}^{p3} – коефіцієнт пропорційності лінеаризованої функції залежності коефіцієнта місцевого гідравлічного опору засувки від її положення:

$$G_{p3} = K_{Gx}^{p3} x_{p3}. \quad (16)$$

З урахуванням співвідношень (14), рівняння (16) перетворюється на:

$$A_H Q_p + B_H n + C_H = H_{ct} + A_c Q_p^2 + A_{p3} x_{p3} Q_p^2,$$

або

$$(A_c + A_{p3} x_{p3}) Q_p^2 - A_H Q_p + [(H_{ct} - C_H) - B_H n] = 0. \quad (17)$$

З виразу (17) може бути отримана функція залежності подачі в робочій точці насоса від двох регульованих параметрів – частоти обертання робочого колеса n та положення регулюючої засувки x_{p3} :

$$Q_p = \frac{A_H + \sqrt{A_H^2 - 4(A_c + A_{p3} x_{p3})[(H_{ct} - C_H) - B_H n]}}{2(A_c + A_{p3} x_{p3})}, \quad (18)$$

яка замикає вираз залежності втрат потужності (13) від регульованих параметрів.

Лінеаризація функції (18) дасть вираз:

$$Q_p = A_{Qp}^n \cdot n + A_{Qp}^{xp3} \cdot x_{p3} + C_{Qp}. \quad (19)$$

З урахуванням (19) функція втрат потужності (13) набуде вигляду:

$$N_{втр}^p = \Delta N = A_{втр}^{n2} \cdot n^2 + A_{втр}^n \cdot n + A_{втр}^{xp32} \cdot x_{p3}^2 + A_{втр}^{xp3} \cdot x_{p3} + A_{втр}^{xp3n} \cdot x_{p3} \cdot n + A_{втр}^0, \quad (20)$$

де коефіцієнти лінеаризації:

$$\begin{cases} A_{втр}^{n2} = A_{Q2} (A_{Qp}^n)^2 + A_{n2} + A_{Qn} A_{Qp}^n \\ A_{втр}^n = 2A_{Q2} A_{Qp}^n C_{Qp} + A_Q A_{Qp}^n + A_n + A_{Qn} C_{Qp} \\ A_{втр}^{xp32} = A_{Q2} (A_{Qp}^{xp3})^2 \\ A_{втр}^{xp3} = 2A_{Q2} A_{Qp}^{xp3} C_{Qp} + A_Q A_{Qp}^{xp3} \\ A_{втр}^{xp3n} = 4A_{Q2} A_{Qp}^n A_{Qp}^{xp3} + A_{Qn} A_{Qp} \end{cases}.$$

Спростивши (20) отримаємо:

$$\Delta N = A_1 \cdot n^2 + B_1 \cdot n + A_2 \cdot x_{p3}^2 + B_2 \cdot x_{p3} + A_3 \cdot n \cdot x_{p3} + A_0 \quad (21)$$

Мінімізувати функцію втрат можна шляхом визначення екстремуму функції $N=f(n, x_{pz})$ (рис. 2) з урахуванням обмежень

$$\begin{cases} n > 0; \\ x_{pz} \geq x_{pz.min} \end{cases} \quad (22)$$

На низьких частотах обертання насоса його напірна характеристика круто падає [3], проте при зміні подачі в межах $(0,7-1,1) Q_{ном}$, частотне регулювання забезпечує необхідний напір в умовах відкритої засувки, тобто $x_{pz} = x_{pz.min} = 0$.

У цьому випадку мінімум втрат буде на околиці точки:

$$M \left\{ -\frac{B_1}{2A_1}; \left(\frac{A_3 B_1}{4A_1 A_2} - \frac{B_2}{2A_2} \right) \right\}. \quad (23)$$

При великій крутості характеристики мережі та/або значному зменшенні частоти обертання (подачі), $x_{pz.min} \neq 0$.

В цьому випадку

$$M \left\{ -\frac{B_1 + A_3 x_{pz.min}}{2A_1}; x_{pz.min} \right\}. \quad (24)$$

Значення n і x_{pz} , що відповідають мінімальним втратам енергії в нагнітачі, встановлюються (при зміні режимів) або підтримуються САУ.

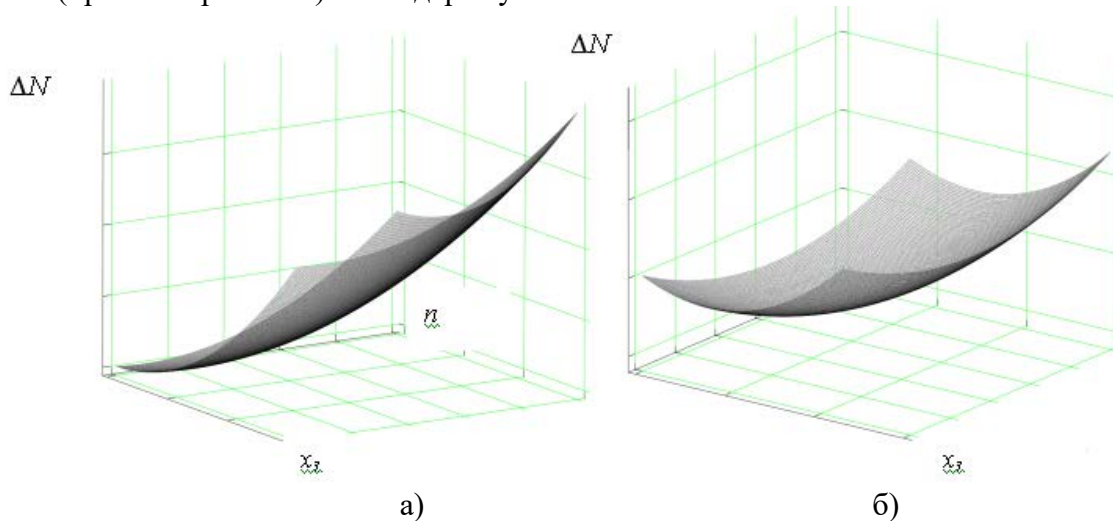


Рис. 2 – Характер залежності енергетичних втрат у нагнітачах від двох параметрів регулювання

При створенні адекватних математичних моделей і виборі доцільного методу оптимізації, розглянутий підхід управління мінімуму енергетичних втрат може бути використаний при синтезі систем управління практично будь-якого енергетичного обладнання електростанцій.

Наявність інших способів регулювання нагнітачів не обмежує можливості використання цього методу, але потребує уточнення математичних моделей та аналізу енергетичних характеристик.

Запропонована система управління адаптивна, що дозволяє більш точно підтримувати необхідні характеристики технологічного процесу, знижуючи тим самим втрати енергії у нагнітачах, а й у енергетичному обладнанні ТЕС і АЕС.

Висновки. 1. Намічено шляхи вирішення важливої та актуальної науково-технічної проблеми створення енергозберігаючих САУ технологічними об'єктами. 2. Сформульовано вихідні наукові принципи, викладено загальну процедуру створення та реалізації енергозберігаючих САУ нагнітачів при частотно-дросельному управлінні.

Список використаних джерел:

1. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 58-62.
2. Мезеря А. Ю. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. П. Лаптинов // Вісник НТУ “ХПІ”. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 12(1055). – С. 90-97.
3. Опыт использования частотного регулирования на энергоблоках 200 МВт / А. С. Мазуренко, В. А. Арсирый, А. Е. Денисова, Л. В. Иванова // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : XV Международ. науч.-техн. конф., 14-17 сент. 2015 г. – Харьков : Белое Озеро.
4. Experimental characterization of two Pumps As Turbines for hydropower generation / Francesco Pugliese, Francesco De Paola, Nicola Fontana, Maurizio Giugni, Gustavo Marini // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 99. Pp. 180–187.
5. Olszewski P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps / Pawel Olszewski // Applied Energy. – 2016. – Vol. 17. – P. 527–539.
6. A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants / Dario Torregrossa, Joachim Hansen, France scHernández-Sancho, Alex Cornelissen, George sSchutz, Ulrich Leopold // Applied Energy. – 2017. – Vol. 208. – Pp. 1430–1440.
7. Анализ параметров работы тягодутьевых машин с различными углами установки лопаток рабочих колес / В. А. Арсирый, В. О. Макаров, Ю. Н. Сербова, О. В. Вишневская // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 3. – С. 35–38.
8. Перекрест А. Л. Системы активного регулирования параметров насосных комплексов / А. Л. Перекрест, Т. В. Коренькова, Д. И. Родькин. – Кременчуг : ЧП Щербатых А.В., 2011. – 180 с.
9. Adnan A.A. Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow / Adnan Aslam, Noon Man-Hoe Kim // Wear. – 2016. – Vol. 364–365. – Pp. 103–111.
10. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. ; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

Reference:

1. Kaniuk, HI, Mezeria, AY et al 2012, ‘Enerhosberehaiushchee upravlenye y povishenye tekhniko-ekonomycheskoi efektyvnosti nasosnikh ustanovok teplovikh i atomnikh elektrostantsyi’ [Energy-saving control and enhancement of the technical-economic efficiency of pump installations in thermal and nuclear power plants], Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovikh tekhnolohiyi, no 3/8 (57), Pp. 58-62.
2. Kaniuk, HI, Mezeria, AY & Laptynov, IP 2014, ‘Model enerhosberehaiushcheho upravleniya nahnetatelnyim ustanovkam teplovikh elektrostantsyi’ [The model of energy-saving control for boiler feed pump systems in thermal power plants], Visnyk NTU “KhPI”: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia, no 12(1055), Pp. 90-97.
3. Mazurenko, AS, Arsyryi, VA, Denysova, AE & Ivanova, LV 2015, ‘Opit ispolzovaniya chastotnoho rehulyrovaniya na enerhoblokakh 200 MVt’ [The experience of using frequency regulation on 200 MW power units], Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: So-vershenstvovanye turboustanovok metodamy matematycheskoho y fizycheskoho modelirovaniya, Kharkov
4. Pugliese, F, De Paola, F, Fontana, N, Giugni, M & Marini, G 2016, ‘Experimental characterization of two Pumps As Turbines for hydropower generation’ Renewable Energy, Vol. 99, Pp. 180–187.
5. Olszewski, P 2016, ‘Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps’ Applied Energy, Vol. 17, Pp. 527–539.
6. Torregrossa, D, Hansen, T, scHernández-Sancho, F, Cornelissen, A, sSchutz, G & Leopold, U 2017, ‘A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants’ Applied Energy, Vol. 208, Pp. 1430–1440.
7. Arsyryi, VA, Makarov, VO, Serbova, YuN & Vyshnevskaya, OV ‘Analiz parametrov raboti tiahodutevikh mashyn s razlychnymy uhlamy ustanovky lopatok rabochykh koles’ [Analysis of the operating parameters of traction machines with various angles of blade installation of the impellers], Kholodylna tekhnika ta tekhnolohiia, no 3, Pp. 35–38.
8. Perekrst, AL, Korenkova, TV & Rodkyn, DY 2011, Systemi aktyvnoho rehulyrovaniya parametrov nasosnikh kompleksov [Active regulation systems for pump complexes parameters], ChP Shcherbatykh A.B., Kremenchnuh.
9. Adnan, AA & Noon Man-Hoe Kim 2016, ‘Erosion wear on centrifugal pump casing due to slurry flow’ Wear, Vol. 364–365, P. 103–111.
10. Cherkasskyi, VM 1984, Nasosi, ventyliatori, kompressori [Pumps, fans, compressors: a textbook for thermal power engineering specialties at universities], Enerhoatomyzdat, Moskva

Стаття надійшла до редакції 26 листопада 2023 року.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ОБЛАДНАННЯМ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

© Придворов С.С., Близниченко Г.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Придворов Сергій Сергійович (Prydvorov Sergii): ORCID: 0009-0004-5164-4997; spridv@ukr.net, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Близниченко Ганна Сергіївна (Blyznychenko Hanna): ORCID: 0000-0002-3177-7280; mr.sancho2002@gmail.com, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті наведено принципи математичного моделювання типовою складною системою управління з розподіленими параметрами, а саме автоматизований технологічний комплекс: теплова електростанція-енергоблок-агрегат (парогенератор, турбогенератор та ін). При моделюванні системи організації управління таким комплексом використовувалось спрощене поняття узагальненого об'єкта управління, що характеризується лише невеликою кількістю загальних головних ознак – блокового компонування та однотипністю основного енергообладнання. Визначено, що компроміс між простотою та повнотою математичного опису складних систем досягається багаторівневим ієрархічним уявленням. Аналіз показав, що завдання моделювання розподілених систем може бути виконане у двох постановках: ставиться завдання відображення розподіленої системи та завдання відтворення стану системи, що моделюється, лише в окремих точках технологічного простору. Встановлені фактори, які впливають на обмеження при математичному моделюванні складних систем. Це складність методів, особливості специфіки об'єкта моделювання та потреба у великих інформаційних ресурсах. Показано, що формалізація самих законів оптимального управління у вигляді відповідних алгоритмів, що являють собою математичне рішення задачі управління, є в даний час однією з найскладніших і до кінця невирішених проблем через їх велику розмірність та відсутність універсальних математичних методів рішення. Для складних завдань раціонального управління ефективним прийомом її вирішенні є декомпозиція основного завдання, тобто розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, які базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

Ключові слова: показники якості, електростанція, енергозбереження, математичне моделювання.

Prydvorov S., Blyznychenko H. «Improving the quality of control systems for energy equipment through enhanced mathematical modeling»

The article discusses the principles of mathematical modeling of a typical complex control system with distributed parameters, namely an automated technological complex: a thermal power station-power unit-unit (boiler, turbine generator, etc.). When modeling the control system for such a complex, a simplified concept of a generalized control object was used, characterized only by a small number of common main features - block composition and uniformity of the main power equipment. It is determined that a compromise between simplicity and completeness of

mathematical description of complex systems is achieved through a multi-level hierarchical representation. Analysis has shown that the task of modeling distributed systems can be approached in two formulations: the task of reflecting the distributed system and the task of reproducing the state of the modeled system only at specific points in the technological space. Factors influencing the limitations of mathematical modeling of complex systems are identified. These include the complexity of methods, the specificity of the modeling object, and the need for large information resources. It is shown that formalizing the laws of optimal control in the form of corresponding algorithms, which represent the mathematical solution to the control problem, is currently one of the most difficult and unresolved problems due to their large dimensionality and the absence of universal mathematical solution methods. For challenging tasks of rational control, decomposition of the main task, i.e., breaking it down into a series of simpler components, is an effective approach to its solution. In decomposition, heuristic methods based on experience and intuition without complete proof of the choice of proposed actions are widely used.

Key words: quality indicators, power station, energy saving, mathematical modeling.

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

Для вирішення того чи іншого завдання управління за допомогою засобів автоматизації вона, перш за все, має бути описана з достатньою точністю математичних залежностей, тобто формалізована. Наразі розроблено математичні методи вирішення низки класів завдань управління, які зумовлюють можливість не суб'єктивного, а наукового підходу до їх формалізації.

При моделюванні об'єкту управління ставиться у відповідність його математична модель - сукупність математичних залежностей, що відбивають ті особливості та властивості об'єкта, які є істотними для досліджуваного процесу управління.

Одному об'єкту може відповідати одна, а ціла сукупність математичних моделей, відбивають різноманітні боку його функціонування. Зазвичай вважають, що з цих моделей виділяється з деякої єдиної і всеосяжної математичної моделі об'єкта і всі приватні моделі у тому чи іншій мірою пов'язані друг з одним. Якщо цим взаємозв'язком можна знехтувати чи врахувати її якимось простим способом, перехід до таких простіших моделей, тобто. декомпозиція загальної задачі суттєво спрощує та полегшує вирішення конкретного завдання управління.

Основне при складанні моделі полягає у виділенні найважливіших факторів у реальній системі, які підлягають вивченню в даному конкретному дослідженні. Ці фактори повинні бути відображені в моделі з найбільшою повнотою та деталізацією, а також збігатися з реальними характеристиками з точністю, що визначається вимогами дослідження.

При моделюванні принципово неможливо отримати повний збіг всіх характеристик та особливостей моделі та об'єкта. Однак за допомогою моделей ці характеристики можна отримати значно простіше, швидше та дешевше, ніж на реальній системі. Моделі значно полегшують розуміння системи, дозволяють її розчленовувати на окремі частини, аналізувати та синтезувати абсолютно різні системи одними методами, прогнозувати поведінку систем у реальних умовах. Перевагою моделі є також можливість порівняно простими засобами змінювати її параметри або вводити зовнішні впливи з метою вивчення реакції системи, що в реальних умовах дуже важко і дорого, а іноді просто неможливо (наприклад, при вивченні поведінки системи в аварійних ситуаціях).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи математичного моделювання промислових об'єктів, що базуються на відомих на сьогодні відповідних розділах теорії автоматичного управління, стосовно моделювання досить складних теплоенергетичних об'єктів, запропоновані в основних роботах В.А. Демченко [1], А.Х. Горелік [2], М.О. Дуель [3], С.Ф., Артюх [4], а також ряд інших авторів. Показники якості

електростанцій визначені в основній стратегії розвитку енергетики України [4], а також в економічній політиці енергозбереження [6] та зазначено перспективи в цьому напрямі [7]. Математичному моделюванню елементів енергоблоку присвячено велика кількість наукових робіт. Так вирішується задача оптимального розподілу навантаження між енергоблоками [8], розробляються прецизійні [9] та енергозберігаючі системи керування [10]. Досліджуються багатоканальні оптимальні регулятори [11] та автоматизовані системи визначення показників якості обладнання [12], розробляються методи і моделі оптимізації показників якості регулювання [13] та математичне моделювання окремих елементів енергоблоку [1, 14, 15]. Але не зважаючи на велику кількість робіт, бракує загального наукового підходу до опису математичних моделей в складних системах, де використовується принцип декомпозиції та має місце висока ступінь ієрархізації виробничих процесів.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є упорядкування досвіду математичного моделювання складних об'єктів енергетики та подальшого використання в складних ієрархічних системах керування

Виклад основного матеріалу

Найбільш простими математичними моделями об'єкта управління є його детерміновані та статистичні моделі. При цьому не враховуються випадкові зміни параметрів та перехідні процеси. Більш складні детерміновані динамічні і стохастичні моделі, що відбивають вплив на об'єкт значень вхідних впливів у даний, а й у минулі моменти часу і коли процеси в об'єкті чи його частина описуються випадковими функціями часу. У цих випадках для вирішення завдань управління доводиться використовувати складний математичний апарат теорії ймовірностей та математичної статистики.

Типовим прикладом складної системи управління з розподіленими параметрами в теплоенергетиці є автоматизований технологічний комплекс: теплова електростанція-енергоблок-агрегат (парогенератор, турбогенератор та ін). При моделюванні системи організації управління таким комплексом можна скористатися спрощеним поняттям узагальненого об'єкта управління, що характеризується лише невеликою кількістю загальних головних ознак – блокового компонування та однотипністю основного енергообладнання.

Структура розподіленої системи управління узагальненої ТЕС, реалізована з допомогою різних технічних засобів, показано на рис.1.

Кожен елемент цієї системи має власний центр (щит) управління, всі разом – систему ешелонів організаційної ієрархії, що склалася: центральний, блоковий і місцевий (агрегатний) щити управління (ЦЩУ, БЩУ і МЩУ). Цю ієрархію формалізують так:

$$S_j = \{S, >\}, \quad (1)$$

де: S – задане сімейство керованих підсистем S_j ; $j \in J$ – кінцева множина значень індексу $j = \{1, 2, \dots, m\}$; $>$ – впорядковує S ставлення, таке, що з $m > m-1$ підсистема (елемент) S_m має пріоритет стосовно S_{m-1} .

Наприклад, ЦЩУ має пріоритет стосовно БЩУ у сенсі прийняття рішень з управління.

Ієрархічний принцип організації управління ТЕС сприяє вирішенню конфліктних ситуацій, що виникають при цьому, наприклад:

1. Управління подачею повітря в топку за умовою стабілізації O_2 (у відсотках) за котлом, що задається режимною картою, може відрізнятись від оптимального завдяки мінливості фактичного оптимуму O_2 . Розбіжність чисельних значень критеріїв управління (внутрішньорівневий конфлікт цілей) можна усунути втручанням вищого центру (розпорядженням старшого оператора енергоблоку) або подачею керуючого сигналу загальнооблокової АСУ ТП, що має у складі програмного забезпечення спеціальну прикладну програму з корекції критерію управління в нових умовах роботи.

2. Протиріччя між системами стабілізації теплового навантаження окремого енергоблоку за умовами економії палива та регулювання частоти та потужності станції в цілому, за умовою стабілізації частоти на електричних шинах станції (міжрівневий конфлікт цілей управління).

Названі протиріччя усувають покладанням лише на одну систему (елемент) права прийняття рішення, спрямованого на досягнення глобальної мети управління. У наведеному прикладі таким елементом (центром) є ЦЦУ. Маючи експериментальні або аналітичні залежності, що встановлюють зв'язок між вхідними і вихідними величинами об'єкта управління (x_j , y_j), інформаційними і керуючими сигналами підсистем управління (z_j , u_j), можна записати ці зв'язки у вигляді простого абстрактного функціоналу:

$$y_j = S_j(x_j, u_j, z_j). \quad (2)$$

Вимоги до складання детермінованих математичних моделей суперечливі. З одного боку, вони мають бути повними, з іншого – досить простими розуміння користувачів. Компроміс між простотою та повнотою математичного опису складних систем досягається багаторівневим ієрархічним уявленням.

Умови складання незалежних моделей сімейства підсистем S_j , що взаємодіють між собою за допомогою інформаційної H_j та керуючої C_j функцій, можуть бути записані у формі вхід-вихід:

$$z_{j+1} = H_j(y_j); u_{j-1} = C_j(y_j); \quad (3)$$

Енергоблоки ТЕС, які є її основними структурними елементами, є складними динамічними системами з розподіленими параметрами.

Загальні властивості подібних систем полягають у тому, що технологічні процеси, що протікають в них (наприклад, процес генерації пари в парогенераторі) можна розглядати як одномірні розподілені системи, довільна точка технологічного простору яких може бути задана однією просторовою координатою.

Характерною особливістю таких розподілених процесів є те, що їх стан можна визначати двома різними способами: або розглядати зміну параметрів процесу в часі у фіксованих точках технологічного простору, або розглядати зміну параметрів уздовж просторової осі процесу в окремі фіксовані моменти часу. У першому випадку стан процесу визначається звичайними часовими сигналами, що надходять з окремих точок технологічного простору. У другому випадку стан процесу визначається функцією зміни параметрів уздовж просторової осі процесу в даний момент часу, яка названа просторовим сигналом розподіленого процесу.

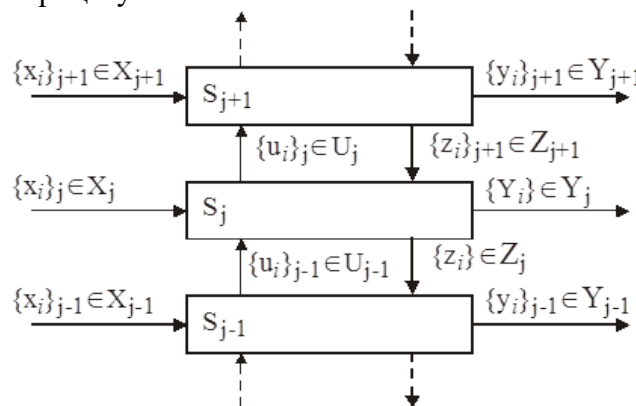


Рис. 1 – Структура багаторівневої ієрархічної системи

S_j - підсистема, сімейство математичних моделей; $j = (1 < j < m)$ – міжсистемні індекси; $\{x_i\}_j \in X_j$, $\{y_i\}_j \in Y_j$, $\{z_i\}_j \in Z_j$, $\{u_i\}_j \in U_j$ – підмножина вхідних, вихідних, інформаційних та керуючих сигналів; $i = (1, 2, \dots, g, k, l, n, \dots)$ – кінцева множина внутрішньосистемних індексів.

Стан таких систем у випадку визначається диференціальними рівняннями у приватних похідних і відповідно двовимірними передатними функціями і частотними характеристиками. Для дослідження властивостей таких систем у просторовій ділянці можуть бути використані просторові передавальні функції та частотні характеристики, що є відповідно зображеннями Лапласа та Фур'є просторових сигналів для фіксованих моментів часу при імпульсному (по відношенню до просторової координати) дії.

Просторові передавальні функції та амплітудно-фазові характеристики визначають властивості розподіленої системи у просторовій області та дозволяють як якісно, так і кількісно оцінити розподіленість системи у просторі.

Завдання моделювання розподілених систем може бути виконане у двох постановках. У першому, більш загальному випадку ставиться завдання відображення розподіленої системи. Такі моделі названі просторовими. У просторових моделях інформацію про стан моделі системи отримують у вигляді дискретної тимчасової послідовності просторових сигналів.

У другому, окремому випадку ставиться завдання відтворення стану моделюється системи лише в окремих точках технологічного простору. Такі моделі названі структурними.

Відтворення як структурних, так і просторових моделей за допомогою засобів обчислювальної техніки може виконуватися завданням оператора, що встановлює відповідність між функціями зміни вихідних та вхідних параметрів системи, що моделюється, і алгоритму відтворення цього оператора. Таким оператором зазвичай є система диференціальних рівнянь, що описує стан процесу, що моделюється.

Інший спосіб моделювання систем – завдання функціоналу, що визначає значення параметрів системи на виході в залежності від функції зміни вхідних величин та алгоритму відтворення такого функціоналу. У загальному випадку моделювання нелінійних систем як таке функціональне співвідношення може бути прийнятий функціональний ряд Вольтера, який для лінійних систем вироджується в інтеграл згортки.

При відтворенні в цифрових обчислювальних машинах просторових лінійних моделей ядром функціоналу є просторова імпульсна характеристика розподіленої системи, що моделюється. Необхідно відзначити, що незважаючи на наявність потужного математичного апарату, його практичне використання поки що є обмеженим у технічних системах автоматичного управління. Це зумовлено, переважно, такими причинами:

- наявні методи через свою складність мало доступні для інженерного проектування;
- специфіка об'єктів управління та технічних процесів не дозволяє вирішувати поставлені завдання математичного моделювання лише на основі зазначених вище загальних методів, а потребує додаткових теоретичних та експериментальних досліджень;
- використання складних та багатовимірних методів в АСУ ТП енергетичних об'єктів та технологічних процесів потребує великих ресурсів інформаційного та програмно-технічного забезпечення.

Ці обставини зумовили пошук спрощених способів математичного моделювання для можливості їх практичної реалізації в АСУ ТП як на рівні ЕС, так і на загальноблочному та агрегатному рівнях керування.

У тих випадках, коли може бути прийнято припущення про об'єкт як систему із зосередженими параметрами, перехідні процеси зазвичай описуються звичайними диференціальними рівняннями.

Формалізація мети управління полягає у виведенні та дослідженні особливостей математичної залежності між критерієм управління (показником якості управління) та параметрами математичної моделі. У задачах оптимального керування шукається екстремум критерію керування. Часто метою управління лише виконання заданих обмежень на вихідні величини (параметри), тобто. забезпечення нормального функціонування об'єкта.

Формалізація самих законів оптимального управління у вигляді відповідних алгоритмів, що являють собою математично суворе рішення задачі управління, є в даний час

однією з найскладніших і до кінця невирішених проблем через їхню велику розмірність та відсутність універсальних математичних методів рішення.

Для порівняно простих випадків оптимального управління можливе безпосереднє вирішення завдань для всієї системи, що розглядається як єдине ціле, із загальним критерієм управління. У цьому обчислюються значення всіх параметрів системи, відповідних оптимальному рішенню, і завдання зводиться підтримки цих заданих значенні параметрів, тобто. до порівняно нескладних схем автоматичної стабілізації, програмного чи стежить регулювання. Слід наголосити, що подібний підхід до розв'язання задачі оптимального управління є нині найпоширенішим.

Для важких завдань раціонального управління ефективним прийомом за її вирішенні є декомпозиція основний завдання, тобто її розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, що базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

Зазвичай при цьому слідує ієрархічності існуючих систем управління, що природно склалася. Це дозволяє уявити вихідне завдання як комплекс набагато більш простих завдань, які певним чином розташовані по сходах ієрархії з властивими подібним системам особливостями: спрощення видів зв'язку між змінними принаймні переміщення по ієрархії знизу вгору, зменшення при цьому необхідної для управління інформації та «скородії» керуючих дій і т.д.

Істотне спрощення багатьох завдань досягається також завдяки зменшенню інтервалів часу, у яких вирішуються завдання управління.

При декомпозиції завдань управління відбувається як декомпозиція цілей управління, і виникнення їх ієрархії. Управління кожним із елементів складного об'єкта за приватним критерієм вимагає ув'язування не тільки із загальним критерієм управління, а й із приватними критеріями всіх інших елементів. Пріоритет критерію, очевидно, повинен бути тим вищим, чим вищий ступінь управління стосовно аналізованої. Практично це досягається шляхом завдання верхнім щаблем нижньої додаткових обмежень.

Після формалізації приватних завдань управління може бути розглянута можливість їх подальшого спрощення (наприклад, заміна нелінійної динамічної моделі лінійної щодо малої флуктуації параметрів у динамічних процесах; заміна динамічної моделі статичної при обліку впливу динаміки об'єкта у вигляді «перешкоди» тощо).

Вибір конкретних математичних методів на вирішення підготовленої в такий спосіб тієї чи іншої завдання управління залежить від особливостей і характеристик досліджуваної системи, а й від обмежень, накладених на процес управління конструкцією технологічного устаткування й режимами його експлуатації.

Дотримуючись залежності (2) стосовно кожного енергоблоку ЕС кінцеві множини вхідних впливів $x=\{x_i\}$ X є зміною витрати води, палива, повітря і т.д. До безлічі вихідних впливів (сигналів) $y=\{y_i\}$ Y відносять зміни електричної потужності, продуктивності парогенераторів та турбогенераторів, а також параметри, що характеризують стан енергоносіїв на виході блоку (тиск, температура, ентальпія та ін.).

Для окремих моделей «відповідним» рівнем математичної абстракції будуть рівняння матеріального та енергетичного балансів, за якими розраховуються ТЕП енергоблоків та станції в цілому, а також диференціальні рівняння (передавальні функції, комплексні частотні характеристики та ін.), що описують перехідні процеси в парогенераторах та турбінах. На основі цих рівнянь визначається вид керуючих впливів для досягнення оптимальних значень ТЕП у стаціонарному та перехідних режимах.

Перед складанням математичних моделей ЕС необхідно визначити канали передачі регулюючих, керуючих та впливів, що обурюють, для кожного об'єкта управління. При цьому технологічний об'єкт управління (ТОУ) розглядається у вигляді самостійної ланки складної системи та визначається як сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому технологічного процесу виробництва.

Як об'єкт управління, який характеризує технологічний процес на ТЕС загалом, зазвичай вибирають стандартний енергоблок. У цьому випадку технологічний процес можна представити у вигляді двох послідовних процесів: у парогенераторі та турбогенераторі. Для укрупнених моделей ТЕС подальша деталізація процесів є недоцільною. З іншого боку, представлення математичної моделі ТЕС у вигляді сімейства незалежних моделей двох вертикально підпорядкованих підсистем - електростанції та енергоблоку відповідно до визначення стратифікації складних систем буде неправомірним. Так як зовнішні збурення з боку енергосистеми, які надходять на ТЕС по двох каналах вхідних впливів - частоті та потужності, впливають через загальні шини електростанції на основні вихідні величини ТЕС та енергоблоку одночасно. Це змушує представляти модель ТЕС як сімейства однорівневих моделей енергоблоку з єдиним технологічним процесом, що з двох послідовних процесів.

При математичному описі технологічних процесів ТЕС використовуються моделі статички, що описують стани, що встановилися, і моделі динаміки, що описують перехідні режими. Ці моделі можуть бути побудовані аналітичним та експериментальним методом або в результаті їх спільного використання. Крім того, модель статички може бути отримана з моделі динаміки, як її окремий випадок: з перехідної характеристики при $t \rightarrow \infty$; з передавальної функції при $s \rightarrow \infty$; з частотної характеристики при $\omega \rightarrow \infty$.

Математичні моделі статички об'єктів ТЕС можуть бути представлені кількома видами. Перший вид моделей визначає зв'язок між будь-яким входом x_i і відповідним йому виходом y_i в режимі роботи енергоблоку, що встановився. Моделі складаються у формі рівнянь алгебри, таблиць або графічних залежностей:

$$y_i = f(x_i). \quad (4)$$

Для лінеаризованих систем:

$$y_i = k_i \cdot x_i. \quad (5)$$

Для нелінійних систем, до яких належать всі промислові об'єкти при зміні вхідних сигналів у широкому діапазоні значень, складається додаткове сімейство моделей статички, які визначають зв'язок між значеннями k_i та навантаженням об'єкта, що змінюється від мінімального до номінального значень:

$$y_i = f(l_i), \quad (6)$$

де: $l_i = N_{\phi} / N_o$ (N_{ϕ} - фактична, N_o - номінальне навантаження).

Моделі динаміки промислових об'єктів, що використовуються в завданнях управління, найчастіше складаються із застосуванням способів декомпозиції складних систем та методів структурного аналізу, які дозволяють уявити складні системи у вигляді з'єднання простіших ланок.

Висновки

При створенні нових АСУ ТП енергоблоків, електростанцій та енергосистем слід виходити не тільки зі структури організаційного управління, що склалася. Необхідно передусім дотримуватись системного підходу до проблеми автоматизованого управління загалом і до основного завдання, яке система має вирішувати. Для цього використовуються категорії математичної страти, дерева цілей, шару прийняття рішень та організаційної ланки (центру) управління. У зв'язку з тим, що центри верхнього рівня мають справу з укрупненими підсистемами, проблема прийняття рішення розглядається тут як складніша, а математичні моделі верхніх страт завжди мають більше невизначеностей порівняно з нижніми. Наприклад, на верхньому рівні управління ЕС виникає необхідність урахування додаткових джерел зовнішніх збурень (додаткових невизначеностей) каналами міжсистемних зв'язків та інших факторів. Для важких завдань раціонального управління ефективним прийомом за її вирішенні

є декомпозиція основний завдання, тобто її розбиття на ряд простіших складових. При декомпозиції широко використовують евристичні методи, що базуються на результатах досвіду та інтуїції без повного доказу вибору запропонованих дій.

Список використаних джерел:

1. Демченко В. А. Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЕС / В. А. Демченко. – Одеса : Астропринт, 2001. – 308 с.
2. Горелік А. Х. Автоматизовані системи управління технологічними процесами ТЕС та АЕС / А. Х. Горелік. – Харків : НТУ "ХПІ", 2004. – 236 с.
3. Дуель М. А. Автоматизовані системи керування енергоблоками теплових та атомних електростанцій / М. А. Дуель. – Харків : ПП "КиК", 2006. – 420 с.
4. Артюх С. Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С. Ф. Артюх, М. А. Дуель, І. Г. Шелепов. – Харків : Знання, 2001. – 416 с.
5. Нова енергетична стратегія України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (дата звернення 23.11.23)
6. Оцінка енергетичної політики України в порівнянні з кращими європейськими практиками реалізації політики у сфері енергоефективності та відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] / Д. Вайс, В. Каленборн, Г. Брандл та ін.; за ред. Д. Вайса. – Київ, 2014. – Режим доступу : http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf. (дата звернення 23.11.23)
7. Халатов А. А. Енергетика України: сучасний стан та найближчі перспективи / А. А. Халатов // Вісник НАН України. – 2016. – № 6. – С. 53–61.
8. Анализ методов и моделей оптимального распределения нагрузок между энергогенерирующими объектами / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Д. И. Кухтин, В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша // Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – 2015. – № 16. – С. 117–123.
9. Канюк Г. И. Прецизионные системы автоматического регулирования гидротурбины / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2015. – № 17(1126). – С. 91–96.
10. Модель энергосберегающего управления низкопотенциальным комплексом электростанций по оптимуму расхода циркулярной воды / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. Р. Фокина, И. А. Бабенко // Молодой Вчений. – 2015. – №6(21), ч.1. – С. 27–31.
11. Куценко А. С. Уточнение параметров нелинейных оптимальных регуляторов каналов многоканальных систем при последовательном синтезе / А. С. Куценко, Т. Б. Никитина // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии. – Харьков, 2005. – Вып. 59. – С. 17–25.
12. Любчик Л. М. Коррекция автоматизированного расчета технико-экономических показателей энергоблока / Л. М. Любчик, Г. Л. Гринберг // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тем. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – Вып. 19.
13. Северин В. П. Моделі і методи оптимізації показників якості систем автоматичного управління енергоблоку атомної електростанції : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.07 / В. П. Северин. – Харків, 2007. – 35 с.
14. Северин В. П. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – № 19. – С. 145–150.
15. Интеллектуальный анализ при комплексном моделировании для повышения надежности работы энергетического оборудования / В. А. Арсирый, С. Г. Антошук, Е. А. Арсирый, В. И. Кравченко. // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 6(58). – С. 89–94.

Reference:

1. Demchenko, VA 2001, *Avtomatyzatsiia ta modeliuvannia tekhnologichnykh protsesiv AES ta TES [Automation and modeling of technological processes at NPPs and TPPs]*, Astroprint, Odesa.
2. Horelik, AK 2004, *Avtomatyzovani systemy upravlinnia tekhnologichnymy protsesamy TES ta AES [Automated control systems for technological processes at TPPs and NPPs]*, NTU "KhPI", Kharkiv.
3. Duel, MA 2006, *Avtomatyzovani systemy keruvannia enerhoblokamy teplovykh ta atomnykh elektrostantsii [Automated control systems for power units of both thermal and nuclear power plants]*, PP "KiK", Kharkiv.
4. Artiukh, SF, Duel, MA, Shelepov, IH 2001, *Avtomatyzovani systemy keruvannia tekhnologichnymy protsesamy v enerhetytsi [Automated control systems for technological processes in the energy sector]*, Znannia, Kharkiv.
5. Kabinet Ministriv Ukrainy 2017, *Nova enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2035 roku: «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozh-nist» [The new energy strategy of Ukraine until 2035 "Security, Energy Efficiency, Competitiveness"]*, viewed 23 November 2023 <<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>>

6. Vais, D, Kalenborn, V, Brandl, H 2014 *Otsinka enerhetychnoi polityky Ukrainy v porivnianni z krashchymy yevropeiskymy praktykamy realizatsii po-lityky u sferi enerhoefektyvnosti ta vidnovliuvanoi enerhetyky* [The assessment of Ukraine's energy policy compared to the best European practices in implementing policies related to energy efficiency and renewable energy sources], viewed 23 November 2023 <http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf>.
7. Khalatov, AA 2016 'Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan ta naiblyzhchi perspektyvy' [Energy sector in Ukraine: current state and near-term perspectives], *Visnyk NAN Ukrainy*, no 6, Pp. 53-61.
8. Efymov, AV, Potanyina, TV, Kukhtyn, DY, Kavertsev, VL & Harkusha, TA 2015, 'Analyz metodov y modelei optymalnoho raspredeleniya nahruzok mezhdu enerhoheneryu-yushchymy ob'ektamy' [Analysis of methods and models for optimal load distribution among energy-generating facilities], *Vestnyk NTU «KhPY»: Seryia «Enerhetycheskie y teplotekhnicheskyye protsessy y oborudovanye»*, no 16, Pp. 117-123.
9. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU & Melnykov, VE 2015, 'Pretsyzionnie systemy avtomatycheskoho rehulyrovannya hydroturbyny' [Precision automatic regulation systems for hydro turbines], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya "Enerhetychni ta teplotekh-nichni protsesy y ustatkuvannia"*, no 17(1126), Pp. 91-96.
10. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU, Fokyna, AR & Babenko, YA 2015, 'Model enerhosberehaushchego upravleniya nyzkopotentsyalnim kompleksom elektrostantsyi po optymumu raskhoda tsyrkvodi' [Model of energy-saving control for a low-potential complex of power stations optimizing water circulation], *Molodyi Vchenyi*, no 6(21), ch. 1, Pp. 27-31.
11. Kutsenko, AS & Nykityna, TB 2005, 'Utochnenye parametrov nelyneinikh optymalnikh rehulyatorov kanalov mnohokanalnikh system pry posledovatelnom synteze' [Refinement of parameters for nonlinear optimal controllers of channels in multi-channel systems through sequential synthesis], *Vestnyk NTU «KhPY». Systemnyi analiz, upravlenye y informatsionnye tekhnolohyy*, Iss. 59, Pp. 17-25.
12. Liubchyk, LM & Hrynberh, HL 2006, 'Korreksyia avtomatyzirovannoho rascheta tekhniko-ekonomycheskykh pokazatelei enerho-bloka' [Correction of automated calculation of technical and economic indicators of a power unit], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Tematychnyi vypusk: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii*, Iss 19.
13. Severyn, VP 2007, 'Modeli i metody optymizatsii pokaznykiv yakosti system avtomatycheskoho upravlinnia enerho-bloku atomnoi elektrostantsii' [Models and methods for optimizing the quality indicators of automatic control systems for a nuclear power plant's power unit], *Doct.tekhn.n. abstract*, Kharkiv.
14. Severyn, VP, Nykulyna, EN 2006, 'Matematycheskoe modelirovanye paroheneratora atomnoho enerhobloka' [Mathematical modeling of the steam generator of a nuclear power unit], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut»*, no 19, Pp. 145-150.
15. Arsyryi, VA, Antoshchuk, EA, Arsyryi, EA & Kravchenko, VY 2012, 'Yntellektualnii analiz pry kompleksnom modelirovannyi dlia povishenya nadezhnosti raboti enerhetycheskoho oborudovannia' [Intelligent analysis in comprehensive modeling to enhance the reliability of energy equipment operation], *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, no 6(58), Pp. 89-94.

Стаття надійшла до редакції 27 листопада 2023 року.

ЗАСТОСУВАННЯМ ЧУТТЄВОЇ СТАТИСТИЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ В МАШИНОБУДУВАННІ

Тріщ Р.М.¹, Грінченко Г.С.², Катрич О.О.¹, Яковлев М.Ю.³,
Багаєв І.О.², Мірошник Є.І.¹

¹Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
"Харківський авіаційний інститут"

²Українська інженерно-педагогічна академія

³Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки
Збройних Сил України

Інформація про авторів:

Тріщ Роман Михайлович (Trishch Roman): ORCID: 0000-0002-9503-8428; e-mail: trich_@ukr.net, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@uira.edu.ua кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Катрич Олег Олександрович (Katrych Oleh): ORCID: 0000-0002-5749-6006; e-mail: o.katrich@kernel.ua, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", докторант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна.

Яковлев Максим Юрійович (Yakovlev Maxym): ORCID: 0000-0002-3009-0719; e-mail: myug2015@gmail.com, Центральний науково-дослідний інститут озброєння і військової техніки Збройних Сил України, Харків, 61000, Україна

Багаєв Ігор Олександрович (Bahaiev Ihor): ORCID: 0000-0002-9101-5114.; e-mail: i.a.bagayev@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мірошник Євген Іванович (Miroshnyk Yevhen): ORCID: 0009-0008-5391-1066; e-mail: y.i.miroshnyk@khai.edu, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки, вул. Чкалова, 17, Харків, 61000, Україна

В статті розглянуто підходи до оцінювання моделі точності виготовлення деталей з позиції адекватності. Для перевірки адекватності моделі пропонується використовувати чуттєву характеристику. На масових експериментах перевірено гіпотезу про відповідність законів розподілу певним видам механічної обробки. Проаналізовано та виокремлено основні проблеми при виробництві деталей, а саме чинники, що впливають на якість процесів. Так, врахування всіх чинників є складною задачею, що вирішується за допомогою застосування на практиці параметрів розсіювання дійсних розмірів, які вивчають за допомогою законів розподілу. Визначення розсіювання дійсних розмірів у виробничих процесах використовує закони розподілу для аналізу та прогнозування відхилень. Це допомагає удосконалити точність обробки та забезпечити високу якість виготовлених деталей. В статті запропоновано використання чутливої "λ-характеристики" для оцінки адекватності моделі точності виготовлення у зв'язку з тим, що традиційні критерії згоди не завжди гарантують достатню адекватність. Використання "λ-характеристики" дозволяє отримати більш точний опис закону розподілу. Запропонована методика використання "λ-характеристики" виявляється перспективною для застосування в промисловості, враховуючи деталізовану інформацію, яку надає "λ-характеристика".

Ключові слова: оцінювання якості, точність технології, адекватність, закон розподілу, механічна обробка

Trishch R., Hrinchenko H., Katrych O., Yakovlev M., Bahaiev I., Miroshnyk Ye.
“Application of a sensory statistical characteristic for quality assessment in mechanical engineering”

The article considers approaches to evaluating the model of parts manufacturing accuracy from the standpoint of adequacy. To check the adequacy of the model, it is proposed to use a sensory characteristic. The hypothesis about the conformity of the distribution laws to certain types of machining is tested on mass experiments. The main problems in the production of parts, namely the factors that affect the quality of processes, are analysed and highlighted. Thus, considering all factors is a complex task that can be solved by applying in practice the parameters of scattering of actual dimensions, which are studied using the laws of distribution. Determining the scatter of true dimensions in manufacturing processes uses distribution laws to analyse and predict deviations. This helps to improve machining accuracy and ensure high quality of manufactured parts. The article proposes the use of a sensitive " λ -characteristic" to assess the adequacy of the manufacturing accuracy model, since traditional agreement criteria do not always guarantee sufficient adequacy. The use of the " λ -characteristic" allows to obtain a more accurate description of the distribution law. The proposed methodology for using the " λ -characteristic" appears to be promising for use in industry, given the detailed information provided by the " λ -characteristic".

Keywords: quality assessment, technology accuracy, adequacy, distribution law, machining

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

Ключовим елементом успішної економічної діяльності України на світовому ринку є виробництво конкурентоспроможної продукції, особливо в галузях, які традиційно забезпечують експорт. Машинобудування виступає як стратегічно важлива галузь промисловості в країні, оскільки його розвиток є визначальним для якості продукції в інших галузях національної економіки. Сучасне машинобудування має за мету виготовлення високоякісної та конкурентоспроможної продукції, при цьому якість виробу залежить від якості підготовчих процесів, обробки, монтажу, тобто повинні забезпечувати якість всіх технологічних процесів.

Найважливішим показником якості в технології машинобудування є точність механічної обробки. Фактична точність залежить від безлічі різних чинників, серед яких є якість та точність обладнання, якість інструментів, стабільність процесу, системи вимірювання і контролю, умови робочого середовища, а також тривалість роботи і знос інструменту. Результат дії цих факторів спрогнозувати дуже важко, але результатом впливу чинників є розсіювання дійсних розмірів, яке вивчають за допомогою законів розподілу. Крім того, вивчення розсіювання дійсних розмірів у виробничих процесах використовує закони розподілу для аналізу та прогнозування відхилень. Це допомагає удосконалити точність обробки та забезпечити високу якість виготовлених деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Точність механічної обробки важлива в технології машинобудування і може бути визначена рядом чинників, які можуть впливати на точність механічної обробки, так наприклад:

- якість та точність самого обладнання, такого як верстати, фрезери, токарні, мають прямий вплив на результат обробки;
- якість інструментів, використовуваних у процесі обробки, включаючи свердла, фрези, токарні ножі, грати, може впливати на точність і якість обробки;
- контроль та управління параметрами процесу, такими як швидкість обертання, подача інструменту, глибина різь і температура, є важливими для забезпечення стабільності та точності обробки;
- використання точних систем вимірювання та контролю для перевірки розмірів в процесі обробки допомагає виявляти будь-які відхилення та коригувати їх;

- фактори робочого середовища, такі як температура, вологість і стійкість до коливань, можуть впливати на точність обладнання та процесу механічної обробки;
- час роботи та стан інструменту можуть впливати на його точність та здатність зберігати геометричні характеристики.

Врахування цих чинників допомагає покращити точність виробничих операцій і забезпечити високу якість виготовлених деталей. Закони розподілу, можуть використовуватися для вивчення розсіювання дійсних розмірів та оцінки ступеня варіації у виробничих процесах.

Вирішення питань забезпечення якості та точності виробничих операцій розглядається з різних позицій сучасними дослідниками. Так, у працях [1, 2] обговорюються методи автоматичного налаштування, що ґрунтуються на припущенні про лінійний характер зміщення налаштувань інструменту щодо поверхні деталі. Головною метою використання цих методів є зменшення розсіювання розмірів деталей до певного значення. Це досягається шляхом періодичної корекції положення інструменту в тих випадках, коли розміри деталей перетинають межу допуску. Між границями налаштувань знаходиться зона нечутливості. Інформація про розміри всередині цієї зони не використовується для керування, що призводить до того, що такі методи не забезпечують досягнення максимальної точності обробки або використовуються при виготовленні деталей з грубою якістю точності.

У роботі [3] представлений метод пульсуючого підналагодження, в якому обидві межі налаштувань об'єднані в одну, що призводить до усунення зони нечутливості. Підналаштування виконуються на кожному кроці імпульсом, який є постійним за величиною та змінним за знаком. Цей метод надає найповнішу компенсацію систематичної складової та сприяє зростанню випадкової складової похибки механічної обробки. Надалі розвиток автоматичних методів підналагодження спрямований на досягнення максимальної точності механічної обробки в конкретних умовах. При цьому зберігається запропонована для пульсуючого підналагодження об'єднана межа налаштувань, яка, як правило, знаходиться в середині поля допуску. Підвищення ефективності підналагодження досягається за допомогою застосування налаштувального імпульсу, який змінюється як за знаком, так і за величиною.

У роботі [4] детально розглядається оптимальне підвищення точності обробки за допомогою компенсації випадкового зміщення налаштувань, незалежно від наявності лінійного тренду (який у деяких випадках може і відсутній). У цьому дослідженні використовуються методи статистичного прогнозування. Далі, у роботі [1], проведено науковий аналіз, заснований на теорії оптимальних систем. Таким чином, попередні (як раніше відомі, так і нові) висновки у галузі оптимального автоматичного підналагодження дають можливість компенсувати як лінійний тренд, так і випадкове зміщення налаштувань. Проте слід зауважити, що алгоритми автоматичного підналагодження в усіх цих дослідженнях були розроблені з обмеженими властивостями вихідного процесу, вираженими у його статистичних характеристиках.

У роботах [1, 5] параметри алгоритму підналагодження пов'язані з класом випадкового процесу, що моделює послідовність розмірів заготовок, оброблених без підналагодження. В цих дослідженнях розглядалися процеси з незалежними прирощеннями, стаціонарні процеси з певною кореляційною функцією або дельта-корельовані випадкові послідовності, які накладалися на лінійний тренд і таке інше. У роботах [5-7] були прийняті апріорно відомі параметри лінійного тренду. Таким чином, у більшості випадків, завдання синтезу систем автопідналагодження розв'язується за умови наявності повної апріорної інформації.

Далі розвиток автоматичних методів підналагодження, передусім, пов'язаний з розширенням можливостей алгоритмів, а саме їх універсалізацією для одночасної компенсації довільних трендів та випадкових зміщень налаштувань. У цьому контексті важливо, щоб система автоматичного підналагодження залишалася ефективною в усьому

діапазоні можливих значень параметрів некерованого процесу, включаючи його тренди та кореляційні функції.

Одним з можливих шляхів вирішення цього завдання, як відомо, є надання системі управління адаптивних властивостей. У наявності таких властивостей структура чи параметри алгоритму можуть змінюватися відповідно до оцінки якості результатів управління [8-10]. Цей підхід був використаний у роботах [11,12], де параметри алгоритму коригуються відповідно до поточної оцінки дисперсії розмірів деталей, оброблених з використанням підналагодження, та у роботі [13], де коригування алгоритму (або самоналаштування системи автоматичного підналагодження) відбувається на основі величини відхилень від нуля поточних значень коефіцієнта кореляції між розмірами "підналагоджених" деталей.

Як вже вказувалося раніше, одним з ключових показників якості є точність [14-17]. Під час збірки основні технічні вимоги зводяться до досягнення точності у положенні, обертанні, лінійному переміщенні та інших рухомих частин вузлів і деталей щодо базових поверхонь. Точність визначення відносного положення деталей, особливо в тих випадках, коли на оброблюваній деталі відсутні виступаючі борти, залежить від точності функціонування складального механізму. Максимальні результати в розв'язанні комплексної задачі точності, продуктивності та економічності виробництва продукції (машин і приладів) зазвичай досягаються при врахуванні трьох основних позицій, що охоплюють всі етапи виробництва та експлуатації: конструкторсько-експлуатаційної, технологічної і метрологічної.

Знання закону розподілу дуже важливе для розв'язання практичних задач у технології машинобудування, бо це дає змогу розв'язувати безліч практичних задач за умов повної апріорної визначеності, і це основна умова для розв'язання цих задач за малими вибірками. Також, за відомого закону розподілу значно спрощується метод розв'язання практичних задач за рахунок застосування параметричних критеріїв, які забезпечені методично і табульовані. Останнім часом у машинобудуванні накопичилася велика кількість статистичного матеріалу, який показував, що існують різні закони розподілу і залежать вони від точності (квалітету) механічної обробки [18, 19].

Метою роботи є підвищення точності виготовлення деталей на основі оцінки адекватності моделі точності виробництва деталей.

Виклад основного матеріалу

На практиці, для оцінки закону розподілу, використовують критерії згоди Пірсона, Колмогорова, Мізеса та ін., але згода не означає адекватності, тому бажано крім критеріїв згоди для перевірки моделі на адекватність використовувати чутливі характеристики.

Справді, спростування гіпотези в жодному разі не означає логічного спростування, так само як і підтвердження гіпотези не спричиняє логічного доказу справедливості гіпотези. Справді, спростування гіпотези може статися і в разі, коли гіпотеза справедлива, але, оскільки ε досить мало, то на практиці вважається, що цією можливістю можна знехтувати. Підтвердження гіпотези може здійснитися і в разі, якщо наша гіпотеза невірна, тому її необхідно перевірити за допомогою інших засобів перевірки.

Необхідно зазначити, що всі критерії згоди, які застосовують (Пірсона, Колмогорова, Мізеса та низку інших), отримано в разі повністю визначеного гіпотетичного розподілу за умови, що обсяг випробувань $n \rightarrow \infty$. На практиці параметри розподілів невідомі і їх оцінюють за вибіркою. Тому граничний розподіл, який використовується для критерію згоди, залежить від прийнятого методу оцінки параметрів. Завдання знаходження граничного при розподілу тільки для величини χ^2 за наявності параметрів, що оцінюються за вибіркою, було розглянуто Фішером, який показав за вельми загальних умов χ^2 , за істотними обмеженнями, що граничним при $n \rightarrow \infty$ розподілом величини, якщо невідомі параметри

$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$, що оцінюються за вибіркою за методом максимальної правдоподібності, є розподіл χ^2 з $(r-1-k)$ ступенями свободи.

Зазначимо, що якщо невідомі параметри оцінюються іншими методами, то граничний при $n \rightarrow \infty$ розподіл величини χ^2 буде, взагалі кажучи, відмінним від χ^2 -розподілу. Зауважимо, що метод максимальної правдоподібності для багатьох розподілів дає зміщені оцінки параметрів розподілу. Тому тут також виникає помилка в оцінці та в твердженні.

Отже, з вище сказаного випливає, що для перевірки на адекватність моделі, нам необхідні, крім критерію згоди, й інші характеристики. Однією з таких характеристик є λ - характеристика.

Форма кривої " λ - характеристика", встановлена за досвідченими даними, є однією з істотних підстав для вибору того чи іншого аналітичного типу функції розподілу. Цю характеристику широко застосовують у курсі теорії надійності. " λ - характеристика" - це інтенсивність відмов.

За визначенням " λ - характеристика" - це модуль темпу спадання функції надійності $\ell(t)$.

$$\lambda(t) = \left| \frac{d}{dt} \ln \ell(t) \right| = -\frac{\ell'(t)}{\ell(t)}$$

Під темпом кривої, як і в економіці, мається на увазі логарифмічна похідна цієї кривої.

Наведемо ще ймовірнісне визначення $\lambda(r)$.

Нехай $p(r, r + \tau)$ - умовна ймовірність відмов об'єкта у віці $(r, r + \tau)$ за умови його невідмови в $(0, \tau)$:

$$p(r, r + \tau) = \frac{F(r + \tau) - F(r)}{1 - F(r)}$$

$p(r)$ - можна назвати віковим коефіцієнтом відмови.

Тоді можна дати таке визначення: " λ - характеристика" - це межа відношення умовної ймовірності $p(r, r + \tau)$ до Δr , коли останнє прагне до нуля.

$$\lambda(r) = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{p(r, r + \tau)}{\tau} = \frac{f(r)}{1 - F(r)}; \quad (1)$$

$\lambda(r)$ - безперервна в усіх точках, де безперервна густина $f(r)$. З виразу (1) випливає, що $\lambda(0) = f(0)$, $\lambda(r) > f(r)$, а максимум $\lambda(r)$, якщо він існує, досягається за більших r , ніж перший максимум $f(r)$.

Користуючись формулою (1) можна отримати, що функція розподілу $F(r)$ визначається через $\lambda(r)$ загальним виразом

$$F(r) = 1 - e^{-\int_0^r \lambda(x) dx} \quad (2)$$

тобто функція розподілу $F(r)$ повністю визначається " λ - характеристикою".

З визначення $\lambda(r)$ можна отримати нерівності:

якщо $[r, r + \tau]$ належить області зростання густини $f(r)$, то

$$\lambda(r) < \frac{1}{\tau} p(r, r + \tau) \quad (3)$$

а якщо області спадання, то

$$\lambda(r) > \frac{1}{\tau} p(r, r + \tau) \quad (4)$$

Якщо $f(r)$ - унімодальна (одночасна), то вираз (3) виконується в домодальному, а вираз (4) - у післямодальному значенні r .

Імовірності $p(r, r + \tau)$ можна безпосередньо виразити через "λ - характеристику":

$$p(r, r + \tau) = 1 - \frac{1 - F(r + \tau)}{1 - F(r)} = 1 - e^{-\int_r^{r+\tau} \lambda(x) dx} \quad (5)$$

Розглянемо питання побудови емпіричної "λ - характеристики".

Зі співвідношення (5) випливає, що

$$\bar{\lambda}_{r,\tau} = \frac{1}{\tau} \int_r^{r+\tau} \lambda(x) dx = -\frac{1}{\tau} \ln [1 - p(r, r + \tau)] \quad (6)$$

Вважаючи інтегральне середнє $\bar{\lambda}_{r,\tau}$ у виразі (6) рівним спостережуваному $\tilde{\lambda}_{r,\tau}$ і замінюючи p на $\tilde{p}$, отримаємо спрощену, хоча й зміщену, оцінку для "λ - характеристики":

$$\tilde{\lambda} = -\frac{1}{\tau} \ln [1 - \tilde{p}(r, r + \tau)] \quad (7)$$

Похибка, додаткова до статистичної, виникає при ототожненні $\tilde{\lambda}_{r,\tau} \cong \bar{\lambda}(r + 0,5\tau)$.

На практиці широко поширена оцінка, заснована на інших припущеннях

$$\bar{\lambda}(\tilde{n}) = \frac{F'(c)}{1 - F(c)} \cong \frac{F(r + \tau) - F(r)}{\tau[1 - F(c)]},$$

$$r < c < r + \tau, \quad c \cong r + 0,5\tau; \quad 1 - F(c) \cong 1 - 0,5[F(r + \tau) + F(r)]$$

$$\bar{\lambda}(r + 0,5\tau) \cong \frac{F(r + \tau) - F(r)}{\tau [1 - 0,5 (F(r + \tau) + F(r))]}, \quad (8)$$

або зручнішій формі в разі безпосередньо спостережуваних упорядкованих даних вибірки обсягу n .

$$\lambda(r_{(i)}) = \frac{n(r_{(i)})}{\left[n - \sum_{j=1}^{i-1} n(r_{(j)}) \right] (r_{(i)} - r_{(i-1)})} \quad (9)$$

У цій формі оцінку (8) можна подавати у вигляді:

$$\bar{\lambda}(r + 0,5\tau) \cong \frac{1}{\tau} \cdot \frac{\tilde{p}(r, r + \tau)}{1 - 0,5 \tilde{p}(r, r + \tau)}, \quad (10)$$

Оцінка (10) також прийнятна, принаймні, для не дуже великих $r(i)$, якщо теоретична $\lambda(r)$ не є необмежено зростаючою.

Відомо, що оцінка "λ - характеристики" схильна до великих випадкових варіацій, особливо наприкінці випробувань, коли кількість об'єктів залишається невеликою. Тому для достовірної оцінки "λ - характеристики" необхідно мати у своєму розпорядженні велику вибірку.

Методика оцінювання розподілу

Підшипник кочення є найпоширенішим складальним вузлом у машинобудуванні і від його точності залежить якість машин. Крім цього, до деталей підшипника кочення (зовнішнє кільце, внутрішнє кільце, кульки або ролики) висуваються високі вимоги до точності їх виготовлення. Точність виготовлення деталей визначає клас точності підшипника. Для оцінки точності виготовлення деталей підшипників кочення проводилися дослідження на ВАТ "Харківський підшипниковий завод", де був проведений статистичний аналіз точності деталей, що обробляються, - кілець підшипника. Було проконтрольовано по 200 деталей різних квалітетів точності. Дійсні значення піддавалися оцінці на адекватність, застосовуючи критерій згоди Пірсона. Аналіз показав узгодженість розсіювання дійсних значень передбачуваним законам розподілу.

Методика оцінки моделі точності виготовлення на адекватність полягає в такому:

1. Будуються графіки теоретичної " λ - характеристики", використовуючи емпіричні значення, для різних законів розподілу:

для закону рівної ймовірності:

$$\lambda(x) = \frac{1}{b-x}, \quad a < x < b$$

для закону Сімпсона:

$$\lambda(x) = \begin{cases} \frac{4(x-a)}{(b-a)^2 - 2(x-a)^2}, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ \frac{2}{b-x}, & \frac{a+b}{2} < x < b \end{cases}$$

для нормального закону:

$$\lambda(x) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right)}{\int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2\right) dx}$$

2. Проводимо вимірювання дійсних розмірів деталей, виготовлених за певних умов, не змінюючи технології. Таких вимірювань має бути досить багато.

3. Вибудовуємо всі значення в порядку зростання, розбиваємо величину розмаху на $\sqrt[3]{n}$ інтервали і рахуємо частоту потрапляння в кожен інтервал.

4. За формулою (9) визначаємо емпіричне значення " λ - характеристики" для кожного інтервалу.

5. Порівнюємо емпіричні значення з теоретичними " λ - характеристиками" для різних законів розподілу.

Висновки

Знання закону розподілу дійсних розмірів деталей дуже важливе, тому що це спрощує розв'язання практичних завдань, пов'язаних з оцінкою, прогнозуванням і управлінням якістю виготовлення. Крім того, знання закону розподілу дає змогу розв'язувати практичні завдання за малими вибірками, що дуже важливо, особливо в серійному виробництві.

Пропонується для оцінки адекватності моделі точності виготовлення використовувати чутливу " λ -характеристику", тому що застосовувані критерії згоди не гарантують адекватності. Ця характеристика дає змогу точніше визначити закон розподілу. Запропонована методика застосування " λ - характеристики" дасть змогу її використовувати в промисловості.

Методика застосування " λ -характеристики" виявляється вельми перспективною для промисловості, оскільки вона пропонує більш точний та чутливий підхід до оцінки

адекватності моделі точності виробництва. За рахунок деталізованої інформації, яку надає "λ-характеристика", можна отримати більш глибоке розуміння закону розподілу, що важливо для вдосконалення та оптимізації виробничих процесів.

Використання "λ-характеристики" дозволяє уникнути недоліків, пов'язаних із застосуванням традиційних критеріїв згоди, і надає можливість враховувати більш різноманітні аспекти розподілу точності виробництва. Отже, впровадження цієї методики може призвести до значного покращення процесів контролю та управління точністю виробництва, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню конкурентоспроможності та задоволенню високих стандартів якості в промисловості.

Список використаних джерел:

1. Vasiljev E. Modal synthesis of precision control systems / E. Vasiljev, E. Serdechnaya, A. Tavolzhanskij // E3S Web of Conferences. – 2020. – № 224 (13). – P. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y. High Dynamic Precision Control System / Y. Vershinin // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research. – 2018. – № 8. – P. 13–18. doi: 10.24247/ijeeerjun20182.
3. Zhang Qingying Computer vision applied in the precision control system / Qingying Zhang // Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition). – 2002. – № 15. – P. 87–89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin F. Automatic debugging of System-on-a-Chip designs / F. Rogin, R. Drechsler, S. Rulke // SOC Conference, IEEE. – Belfast, 2009. – № 11089089. – P. 333–336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang S. Change impact analysis for Aspect J programs / S. Zhang, Z. Gu, Y. Lin, J. Zhao // Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Software Maintenance. – Beijing, 2008. – P. 87–96.
6. Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes / M. Holub [et al.] // Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances. – 2013. – P. 41-48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting / S. Andrei [et al.] // IEEE Transactions on Computers. – 2006. – № 55. – P. 830–842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Винник В. Аналіз методів обробки криволінійних поверхонь кулачків розподільних валів орієнтованим інструментом / В. Винник // Технічні науки та технології. – 2019. – № 4(18). – С. 74-84. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.
9. Шорнікова С. Шорсткість поверхні як одна із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей. методи та засоби контролю / С. Шорнікова // Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С. 13-20. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.5.2.
10. Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів / Пуховський Є., Фролов В., Приходько В., Бецо Ю. // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. – 2023. – № 4 (50). – С. 92-103. DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.
11. Зенкін А. Особливості створення верстатів для складання з'єднань з термодією / Зенкін А., Оборський І., Остапук Ю. // Технологія і техніка друкарства. – 2012. – С. 53-59. DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.
12. Зенкін А. С. Технологія машинобудування / А. С. Зенкін, В. Д. Каразей, Є. О. Гобатюк, М. П. Мазур. – Львів : Новий світ_2000, 2009. – 358 с.
13. Метод віртуального базування деталей з формою, наближеною до форми заготовок / Планковський С. І., Цегельник Є. В., Минтук В. Б., Задорожний С. М., Комбаров В. В. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 4. – С. 74-82. DOI: 10.32620/akt.2020.4.09.
14. Григор'єва Н. С. Прогнозування розвитку комп'ютерно-інтегрованого складального виробництва приладобудування / Григор'єва Н. С., Марчук І. В., Шабайкович В. Аю // Перспективні технології та прилади. – 2022. – С. 32-37. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.
15. Пасічник В. А. Основи комп'ютерно-інтегрованого механоскладального виробництва : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / В. А. Пасічник. – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – 412 с.
16. Точність координувати отворів малого діаметру з напрямком різального інструменту / Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Артюх С. М., Тріщ А. Р. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2021. – № 2 (8). – С.9-14. Doi: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02>
17. Алгоритм проектування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ / Грінченко Г. С., Теслов О., Козлов М. С., Марченко О. О., Захаров С. О., Герасимов Є. В. // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 50-61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
18. Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints / Kupriyanov O., Trishch R., Dichev D., Hrinchenko H. // *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner ; Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. – 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_34

19. Ensuring the quality of fuel equipment joints in series production conditions by graded kitting / Kupriyanov O., Hrinchenko H., Strelchuk R., Kupriyanov M. // World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium Wmcaus, 2022, AIP Conf. Proc. – 2023. – 2889, 030003. DOI:10.1063/5.0173115

References:

1. Vasiljev, E, Serdechnaya, E & Tavalzhanskij, A 2020, 'Modal synthesis of precision control systems', *E3S Web of Conferences*, no 224, Pp. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y 2018, 'High Dynamic Precision Control System', *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, no 8, Pp. 13–18. doi: 10.24247/ijeerjun20182.
3. Zhang Qingying 2002, 'Computer vision applied in the precision control system', *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, no 15, Pp. 87–89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin, F, Drechsler, R & Rulke, S 2009, 'Automatic debugging of System-on-a-Chip designs', *SOC Conference, IEEE*, no 11089089, Pp. 333–336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang, S, Gu, Z, Lin, Y & Zhao, J 2008, 'Change impact analysis for Aspect J programs', *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Software Maintenance*, Pp. 87–96.
6. Holub, M [et al.] 2013, 'Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes', *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*, Pp. 41–48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Andrei, S [et al.] 2006, 'Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting', *IEEE Transactions on Computers*, no 55, Pp. 830–842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Vynnyk, V 2019, 'Analiz metodiv obrobky kryvoliniinykh poverkhon kulachkiv rozpodilnykh valiv oriientovanyim instrumentom' [Analysis of methods for processing the cam profiles of distribution shafts with an oriented tool], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, no 4(18), Pp. 74–84. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-4(18)-74-84.
9. Shornikova, S 2022, 'Shorstkist poverkhni yak odna iz osnovnykh heometrychnykh kharakterystyk yakosti poverkhni detalei. metody ta zasoby kontroliu' [The surface roughness as one of the primary geometric characteristics of surface quality of parts. Methods and means of control], *Tavriiskyi naukovi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky*, no 5, Pp. 13–20. DOI: 10.32851/tmv-tech.2022.5.2.
10. Pukhovskiy, Y, Frolov, V, Prykhodko, V & Betsko, Y 2023, 'Tekhnolohichni problemy vyhotovlennia korpusnykh detalei khimichnykh mashyn ta apparativ' [Technological issues in manufacturing casing parts for chemical machinery and apparatus], *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Seriya: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychyykh protsesiv*, no 4 (50), Pp. 92–103. DOI: 10.32845/msnau.2022.4.13.
11. Zenkin, A, Oborskyi, I, Ostapuk, Yu 2012, 'Osoblyvosti stvorennia verstativ dlia skladannia ziednan z termodiieiu' [Features of creating machines for assembling connections with thermal effect], *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, Pp. 53–59. DOI: 10.20535/2077-7264.2(36).2012.32449.
12. Zenkin, AC, Karazei, VD, Hobatiuk, YO & Mazur, MP 2009, *Tekhnolohiia mashynobuduvannia [Mechanical engineering technology]*, Novyi svit_2000, Lviv.
13. Plankovskiy, SI, Tsehelnyk, YV, Myntiuk, VB, Zadorozhnyi, SM & Kombarov, VV 2020, 'Metod virtualnoho bazuvannia detalei z formoiu, nablyzhenoiu do formy zahotovok' [The method of virtual basing of parts with a shape approximating that of the blanks], *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia*, no 4, Pp. 74–82. DOI: 10.32620/akt.2020.4.09.
14. Hryhorieva, NS, Marchuk, IV & Shabaikovych, VA 2022, 'Prohnozuvannia rozvytku kompiuterno-intehrovanoho skladalnoho vyrobnytstva pryladobuduvannia' [Forecasting the development of computer-integrated assembly production in instrument making], *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady*, Pp. 32–37. DOI: 10.36910/6775-2313-5352-2022-20-05.
15. Pasichnyk, VA 2009, 'Osnovy kompiuterno-intehrovanoho mekhanoskladalnoho vyrobnytstva' [Fundamentals of computer-integrated mechanical assembly production], Dokt. tekhn. n. thesis, Kyiv.
16. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR 2021 'Tochnist koordynuvaty otvoriv maloho diametru z napriamkom rizalnoho instrumentu' [The precision of coordinating small diameter holes with the direction of the cutting tool], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, no 2 (8), Pp. 9–14. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02
17. Hrinchenko, HS, Teslov, O, Kozlov, MS, Marchenko, OO, Zakharov, SO & Herasymov, YV 2022, 'Alhorytm proektuvannia system avtomatychnoho upravlinnia tochnistiu mekhanichnoi obrobky na verstatakh z ChPU' [Algorithm for designing precision control systems for mechanical processing on CNC machines], *Mashynobuduvannia*, iss 29, Pp. 50–61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
18. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Hrinchenko, H 2024, 'Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints' In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-42778-7_34
19. Kupriyanov, O, Hrinchenko, H, Strelchuk, R & Kupriyanov, M 2023, 'Ensuring the quality of fuel equipment joints in series production conditions by graded kitting' *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium Wmcaus 2022, AIP Conf. Proc.* 2889, 030003. DOI: 10.1063/5.0173115

Стаття надійшла до редакції 09 грудня 2023 року.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

© Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Василець Т.Ю.,
Келеберда С.М., Пономаренко А.С., Чирочкін Д.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Канюк Геннадій Іванович (Kaniuk Gennadii): ORCID: 0000-0003-1399-9039; доктор технічних наук; завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Мезеря Андрій Юрійович (Mezerya Andrey): ORCID: 0000-0003-2946-9593; mezzerya@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Василець Тетяна Юхимівна (Vasilets Tetiana): ORCID: 0000-0002-2148-8645; vasylecz.ty@upr.edu.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Келеберда Сергій Миколайович (Keleberda Sergii): ORCID: 0009-0003-1452-3443; keleberda141@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Пonomarenko Артем Сергійович (Ponomarenko Artem): ORCID: 0009-0006-0263-2329; 123ponomarenko123@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Чирочкін Денис Олександрович (Chyrochkin Denis): ORCID: 0009-0005-9029-0471; chirochkin123@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Метою роботи є визначення узагальненого критерію оптимальності показників якості технологічних процесів в енергетиці для використання його в автоматизованих системах керування та підвищення рівня енергоефективності. Завдання статичної та динамічної оптимізації є складними (багатофакторними) та багатоцільовими. Їх рішення здійснюється спільно з урахуванням всього різноманіття факторів і обмежень, що впливають на досягнення оптимуму функції мети. У роботі розглянуто характерний приклад задачі оптимізації (коли функція мети максимізується), а саме завдання управління процесом горіння в топці котла за коефіцієнтом корисної дії, а коли мінімізується – за сумою теплових втрат. Показана постановка задачі динамічної оптимізації значень управляючих та вихідних впливів у функції часу, що забезпечують досягнення заданих критеріїв управління для технологічних процесів у перехідних режимах. Показано, що критерієм оптимальності може бути мінімум втрат енергії в обладнанні. Визначено основні завдання, вирішення яких дозволить підвищити показники якості роботи обладнання та обмеження, що надають суттєвий вплив на вибір методу оптимізації та формування функції мети. Як приклад складена функція енергетичних втрат у нагнітачах, що враховує параметри мережі та власні характеристики нагнітачів. Показано методику визначення функції мінімуму втрат енергії в нагнітачах та алгоритм знаходження втрат енергії за даними, отриманими шляхом апроксимації енергетичних характеристик. Критерій оптимальності як мінімум втрат енергії може бути використаний для будь-якого обладнання енергетики (котел, турбіна, парогазова установка і т.д.) і дозволить забезпечити високі показники якості роботи обладнання.

Ключові слова: показники якості, оптимізація, енергозбереження, техніко-економічні показники

Kaniuk G., Mezerya A., Vasilets T., Keleberda S., Ponomarenko A., Chyorchkin D.
“Optimization of Quality Metrics for Technological Processes in Energy Control Objects”

The purpose of the work is to determine a generalized criterion of optimality for quality indicators of technological processes in energy production to use it in automated control systems and enhance energy efficiency. The tasks of static and dynamic optimization are complex (multifactorial) and multi-objective. Their solution is carried out taking into account the variety of factors and constraints affecting the achievement of the optimal goal function. The work considers a typical example of optimization problem (when the objective function is maximized), namely the task of controlling the combustion process in the boiler furnace based on the coefficient of performance, and when minimized – based on the sum of heat losses. The formulation of the dynamic optimization problem of control and output influences over time is demonstrated, ensuring the achievement of specified control criteria for technological processes in transient modes. It is shown that the criterion of optimality can be the minimum energy loss in equipment. The main tasks are identified, the solution of which will improve the performance of the equipment and constraints significantly influencing the choice of optimization method and formation of the goal function. As an example, a function of energy losses in feed pumps, considering network parameters and the pumps' own characteristics, is composed. The methodology for determining the minimum energy loss function in feed pumps and the algorithm for calculating energy losses based on data obtained through approximation of energy characteristics are presented. The optimality criterion as the minimum energy loss can be used for any power equipment (boiler, turbine, combined cycle plant, etc.) and ensure high performance of the equipment.

Key words: quality indicators, optimization, energy saving, techno-economic indicators

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

Завдання оптимізації техніко-економічних показників (ТЕП) роботи енергетичних установок вирішуються залежно від режимів устаткування. Проблема енергозбереження є актуальним завданням не тільки в системі електроспоживання промислових підприємств, але і в системах власних потреб електростанцій, в яких втрачається від 4 до 8% всієї енергії, що виробляється.

Основними споживачами власних потреб теплових і атомних електростанцій є насоси і вентилятори (нагнітачі), обладнання котелень і турбінних установок. До основних нагнітальних установок відносяться основні циркуляційні насоси (АЕС), живильні насоси (ТЕС), циркуляційні насоси, димососи, дуттьові вентилятори та ін. На їхню частку припадає до 70% всієї споживаної потужності власних потреб.

У нормальному режимі на перший план висуваються завдання економіки, наприклад мінімізації енергетичних втрат, які мають властивість інтегруватися за часом і змінюватися за абсолютним значенням залежно від навантаження.

У перехідних режимах першочерговими стають завдання технології, наприклад підтримки змін технологічних параметрів в межах припустимих відхилень або якнайшвидшого досягнення фактичною потужністю енергоблоку її нового заданого значення.

До статичної оптимізації відносяться завдання визначення екстремуму функції мети залежно від значень змінних параметрів системи y_i і впливів u_i , що управляють, не є функцією часу.

Найбільш поширені завдання статичної оптимізації стосовно систем управління об'єктами ТЕС зводяться до знаходження екстремуму того чи іншого техніко-економічного показника, що використовується як критерій управління, або до пошуку оптимуму співвідношення впливають на нього параметрів системи, наприклад мінімізації питомих витрат палива енергоблокам ТЕС, чи відшукування оптимуму чисельних значень технологічних параметрів, які впливають скорочення енергетичних втрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Особливістю завдань динамічної оптимізації є дослідження динаміки об'єктів та систем управління в лінійному наближенні і, у зв'язку з цим, широке залучення математичних методів лінеаризації вихідних рівнянь та характеристик.

Зазначені особливості завдань статичної та динамічної оптимізації, що вирішуються при управлінні об'єктами ТЕС та АЕС, відносяться до найпоширеніших випадків, які детально розглянуті в роботах [1, 2, 3, 4].

Найбільш уживані в практиці автоматизованого управління енергообладнанням електростанцій методи статичної та динамічної оптимізації розглянуті в роботах [3, 59].

Методи математичного моделювання енергетичних об'єктів описані у роботах В.О. Дем-ченко [1], А.Х. Горелік [2, 5], М.О. Дуель [3], С.Ф. Артюх [6]. Оптимізації роботи електростанцій викладено в основній стратегії розвитку енергетики України [7], а також в економічній політиці енергозбереження [8, 9]. Вирішення завдання оптимального розподілу навантаження між енергоблоками наведено [10]. Розробляються прецизійні [11], енергозберігаючі [12] та багато-канальні оптимальні регулятори [13]; автоматизовані системи розрахунку та підтримки високих показників якості обладнання [14]. Удосконалюються методи і моделі оптимізації показників якості регулювання [15] та математичне моделювання енергообладнання електростанцій [1, 16, 17]. Але в існуючих роботах бракує загального критерію оптимальності роботи енергообладнання, який міг би служити узагальненим та уніфікованим критерієм якості для систем автоматизованого управління.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є визначення узагальненого критерію оптимальності показників якості технологічних процесів в енергетиці з метою використання його в автоматизованих системах керування та підвищення рівня енергоефективності.

Виклад основного матеріалу

Першою особливістю завдань статичної оптимізації є нелінійний, найчастіше екстремальний характер функції мети в залежності від керуючих впливів, технологічних параметрів або навантаження.

Характерним прикладом задачі оптимізації, коли функція мети v_i максимізується, служить завдання управління процесом горіння в топці котла ККД (рис.1), коли v_i мінімізується – управління тим же процесом за сумою теплових втрат.

Як видно з рис.1., в процесі керування приймає участь велика кількість параметрів, до яких належить параметри палива (пал), повітря (пов), живильної води (жв), пари (п), газів, що виходять (вг), активаторів горіння (аг), шлаку (шл), процесів в топці (топ), збурень (зб). Ці параметри характеризуються тиском (P), витратою (B , G , D), температурою (T) та енергією (E). Тобто має місце багатопараметрична оптимізація.

Друга особливість полягає у необхідності врахування різних обмежень, що виникають у процесі вирішення задачі. Наприклад, регулюючі впливи обмежуються за умов матеріальних чи енергетичних ресурсів місцевих систем. Відхилення вихідних координат від розрахункових значень (температури пари по тракту, перепаду тиску на останні щаблі турбін та ін.) лімітуються з міркувань термічної та механічної міцності енергетичних металів та безпеки важкого пошкодження або руйнування енергоустаткування.

До динамічної оптимізації відносяться завдання визначення значень керуючих та вихідних впливів у функції часу $\hat{u}_i(t)$ і $\hat{y}_i(t)$, що забезпечують досягнення заданих критеріїв управління для технологічних процесів у перехідних режимах:

$$\hat{v}_i = g[\hat{u}_i(t), \hat{y}_i(t)].$$

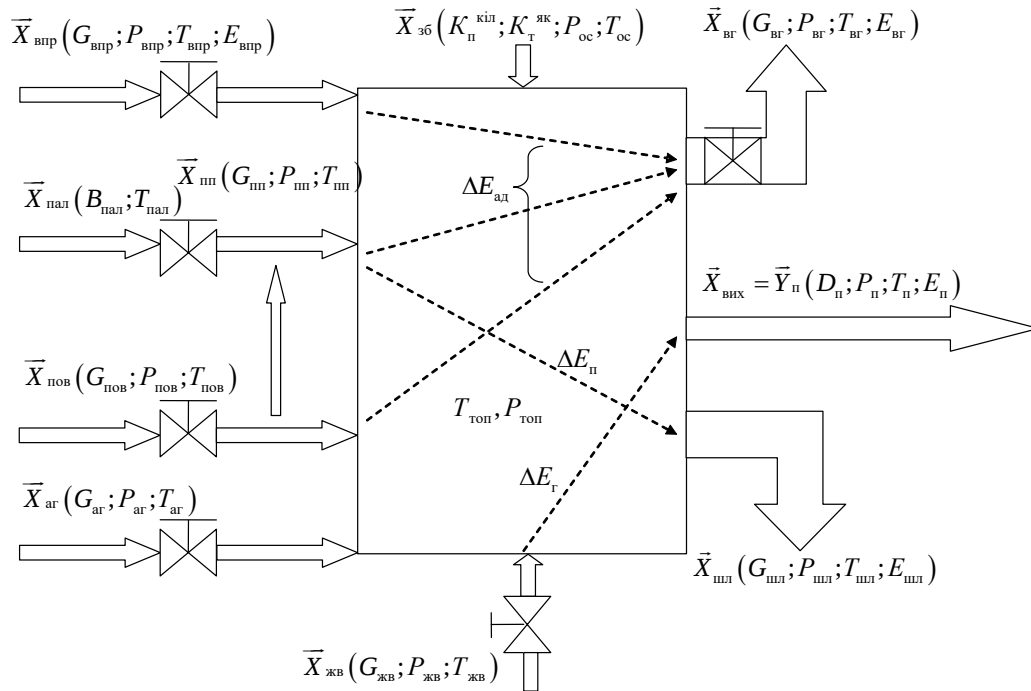


Рис. 1 – Ділянки технологічного процесу котла за основними каналами впливів

Найбільш поширена задача динамічної оптимізації стосовно управління об'єктами електростанцій зводиться до досягнення бажаної форми перехідних процесів $\hat{y}_i(t)$ при заданих граничних умовах $y_i(0)$, $y_i(T)$ і детермінованих вхідних сигналах. При обуреннях, що мають випадковий характер, мінімізуються статистичні показники якості технологічного процесу за вибраним параметром $y_i(t)$, наприклад, дисперсія, середньоквадратичне відхилення та ін.

У практиці проектування автоматизованих систем управління та його експлуатації вирішується ширше коло завдань. Так, наприклад, при статичній оптимізації розроблені методи пошуку екстремуму функції щільності або оптимуму ТЕП для об'єктів і систем, що мають лінійний характер статичних залежностей $v_i = g_i(y_i, u_i)$ [3]. Для завдань динамічної оптимізації розроблені методи їх вирішення стосовно систем управління, що мають суттєво нелінійні ланки у своєму складі [2].

Завдання статичної та динамічної оптимізації переслідують різні цілі. Вони вирішуються різними методами, але результати їх рішень тісно пов'язані. Розглянемо особливості деяких завдань, які вирішуються у процесі управління енергоблоками.

Оптимум температур пари по тракту парогенератора, що визначається в результаті вирішення задачі статичної оптимізації, однаково може бути досягнутий за допомогою поверхневого або впорскує пароохолоджувача. Однак далеко важливо, який характер мають перехідні процеси за температурою при змінах навантаження, особливо при її швидких скиданнях або начерках. Тимчасові відхилення температур не повинні виходити за межі допустимих значень. Цього можна досягти лише за допомогою малоінерційного впорску пароохолоджувача. Отже, задачу оптимізації по температурі пари по тракту парогенератора в цілому необхідно вирішувати з урахуванням динамічних характеристик пароохолоджувача та показників якості перехідного процесу.

Перехід з одного рівня навантаження енергоблоку на інший за умовами економічності його роботи, що визначається в результаті розв'язання задачі статичної оптимізації, пов'язаний з переміщеннями більшості регулюючих органів, у тому числі з палива та повітря. При цьому бажано, щоб неузгодженість між витратами палива і повітря в кожен момент часу було мінімальним. В іншому випадку виникають відчутні втрати теплоти з хімічним або

механічним недопалом палива в топці. Останнє завдання можна вирішити лише шляхом динамічної оптимізації, покращуючи якість перехідного процесу помилково регулювання, наприклад по дисперсії або мінімізуючи його інтегральні показники.

Наведені приклади показують, що завдання статичної та динамічної оптимізації є складними (багатофакторними) та багатоцільовими. Їх необхідно вирішувати спільно з урахуванням всього різноманіття факторів і обмежень, що впливають на досягнення оптимуму функції мети. Однак слід враховувати, що в даний час відсутні конструктивні математичні методи для точного вирішення такого роду завдань у повному вигляді. Поряд з цим необхідно мати на увазі, що ТЕП теплоенергетичних об'єктів, які використовуються в якості функцій мети при розв'язанні задач статичної оптимізації, обчислюються за середніми в часі технологічними параметрами. У результаті вони змінюються значно повільніше порівняно з окремими, безперервно регульованими величинами. Отже, труднощі математичного характеру, з одного боку, і специфічні особливості об'єктів енергосистем – з іншого, призводять до необхідності вирішення завдань статичної та динамічної оптимізації як автономних шляхом використання різних математичних методів.

Розглянемо з прикладу нагнітальних установок, які є основними споживачами потреб електростанцій.

Системи управління нагнітальними установками входять до складу загальних технологічних АСУ ТП електростанцій, забезпечуючи підтримку необхідних технологічних параметрів та економічність роботи нагнітачів та основного енергообладнання (котел, конденсатор і т.д.), впливаючи тим самим на економічність роботи станції в загалом. Підвищення техніко-економічної ефективності роботи нагнітачів можливе шляхом створення автоматизованої системи енергозберігаючого управління режимами його роботи [18].

Для аналізу ефективності режимів роботи нагнітача, його характеристики:

$$\begin{cases} H = H(Q, n); \\ N = N(Q, n); \\ \eta = \eta(Q, n), \end{cases} \quad (1)$$

можуть бути апроксимовані лінеаризованими функціями [19]:

$$\begin{cases} H_p = A_H Q_p + B_H n + C_H; \\ N_p = A_N Q_p + B_N n + C_N; \\ \eta_p = A_\eta Q_p + B_\eta n + C_\eta. \end{cases} \quad (2)$$

Функція енергетичних втрат (втрат потужності) при роботі нагнітача у робочій точці може бути визначена таким чином:

$$\Delta N = N_{втр} = N_{спож} - N_{кор}, \quad (3)$$

де $N_{кор} = H_p Q_p$ – корисна потужність нагнітача..

З урахуванням того, що:

$$N_{кор} = \eta_p N_p, \quad N_{втр}^p = (1 - \eta_p) N_p,$$

або

$$N_{втр}^p = (1 - A_\eta Q_p - B_\eta \cdot n - C_\eta) (A_N Q_p + B_N \cdot n + C_N), \quad (4)$$

функція втрат призводить до вигляду:

$$N_{втр}^p = A_{Q_2} Q_p^2 + A_{n_2} \cdot n^2 + A_Q Q_p + A_n \cdot n + A_{Qn} Q_p \cdot n + C.$$

Подача нагнітач (витрата середовища в робочій точці) Q_p є заданою величиною, що визначається технологічним режимом роботи об'єкта. Вона є функцією двох регульованих параметрів – частоти обертання робочого колеса і положення регулюючої засувки (фактично – і всієї гідравлічної характеристики мережі):

$$H_p = H_{cm} + A_c Q_p^2 + A_{p3} x_{p3} Q_p^2, \quad (5)$$

де

$$A_c = \frac{1}{2g} \sum_{i=1}^n \left[\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \left(\sum_{j=1}^m G_{mj} \right) \right] \frac{1}{S_i^2}; \quad A_{p3} = \frac{K_{Gx}^{p3}}{2g S_{p3o}^g};$$

K_{Gx}^{p3} – коефіцієнт пропорційності лінеаризованої функції залежності коефіцієнта місцевого гідравлічного опору засувки від її положення:

$$G_{p3} = K_{Gx}^{p3} x_{p3}. \quad (6)$$

З урахуванням співвідношень (2):

$$(A_c + A_{p3} x_{p3}) Q_p^2 - A_n Q_p + [(H_{cm} - C_n) - B_n n] = 0. \quad (7)$$

З виразу (7) може бути отримана функція залежності подачі в робочій точці насоса від двох регульованих параметрів – частоти обертання робочого колеса n та положення регулюючої засувки x_{p3} :

$$Q_p = \frac{A_n + \sqrt{A_n^2 - 4(A_c + A_{p3} x_{p3})[(H_{cm} - C_n) - B_n n]}}{2(A_c + A_{p3} x_{p3})}, \quad (8)$$

яка замикає вираз залежності втрат потужності (4) від регульованих параметрів.

Лінеаризація функції (8) дасть вираз:

$$Q_p = A_{Qp}^n n + A_{Qp}^{xp3} x_{p3} + C_{Qp}, \quad (9)$$

З урахуванням (8), функція втрат потужності (4) набуде вигляду:

$$N_{втр}^2 = A_{втр}^{n2} \cdot n^2 + A_{втр}^n \cdot n + A_{втр}^{xp32} \cdot x_{p3}^2 + A_{втр}^{xp3} \cdot x_{p3} + A_{втр}^{xp3n} \cdot x_{p3} \cdot n + A_{втр}^0, \quad (10)$$

де:

$$A_{втр}^{n2} = A_{Q2} (A_{Qp}^n)^2 + A_{n2} + A_{Qn} + A_{Qn} \cdot A_{Qp}^n; \quad A_{втр}^{xp3n} = 4A_{Q2} A_{Qp}^n A_{Qp}^{xp3} + A_{Qn} A_{Qp}^{xp3};$$

$$A_{втр}^n = 2A_{Q2} A_{Qp}^n C_{Qp} + A_{Q2} A_{Qp}^n + A_n + A_{Qn} C_{Qp}; \quad A_{втр}^{xp32} = A_{Q2} (A_{Qp}^{xp3})^2; \quad A_{втр}^{xp3} = 2A_{Q2} A_{Qp}^{xp3} C_{Qp} + A_{Q2} A_{Qp}^{xp3}.$$

Точка (точки) екстремуму $M_i(n_i, x_{p3i})$ визначаються за умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\Delta N)}{\partial n} = 0 \\ \frac{\partial(\Delta N)}{\partial x} = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

Точка екстремуму функції:

$$M \left(-\frac{B_1}{2A_1}; -\frac{B_2}{2A_2} \right). \quad (12)$$

Втрати енергії в точці M (мінімум функції втрат), матимуть таке значення:

$$\Delta N_M = A_1 \frac{B_1^2}{4A_1^2} - \frac{B_1^2}{2A_1} + A_2 \frac{B_2^2}{4A_2^2} - \frac{B_2^2}{2A_2} + A_0 = -\frac{B_1^2}{2A_1} - \frac{B_2^2}{2A_2} + A_0 \quad (13)$$

Рівняння (13) відображає реальний рівень втрат енергії в нагнітачі та визначає техніко-економічні показники його роботи

Висновки

1. Розглянуто питання статичної та динамічної оптимізації технологічних процесів на електростанціях з метою визначення уніфікованого критерію оптимальності техніко-економічних показників, що є основними показниками якості виробництва. Визначено основні завдання, вирішення яких дозволить підвищити показники якості роботи обладнання та обмеження, що надають істотний вплив на вибір методу оптимізації та формування функції мети.

2. Показано, що критерієм оптимальності може бути мінімум втрат енергії в устаткуванні. Як приклад складено функцію енергетичних втрат у нагнітачах, яка враховує параметри мережі та власні характеристики нагнітача.

3. Показано методику визначення функції мінімуму втрат енергії в нагнітачах та алгоритм знаходження втрат енергії за даними, отриманими шляхом апроксимації енергетичних характеристик.

4. Критерій оптимальності як мінімум втрат енергії може бути використаний для будь-якого обладнання енергетики (котел, турбіна, парогазова установка і т.д.) і дозволить забезпечити високі показники якості роботи обладнання.

Список використаних джерел:

1. Демченко В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС / В. А. Демченко. – Одесса : Астропринт, 2001. – 308 с.
2. Александров Е. В. Дисплейное управление в АСУ ТП атомных электростанций / Е. В. Александров, А. Х. Горелик, И. Д. Розенбаум // Энергетика и электрофикация. – 2010, – № 12. – С. 30-35.
3. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками тепловых и атомных электростанций / М. А. Дуэль. – Харьков : ЧП "КиК", 2006. – 420 с.
4. Плетнев Г. П. Автоматизированные системы управления объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – М. : Изд-во МЭИ, 1995. – 352 с.
5. Горелик А. Х. Автоматизовані системи управління технологічними процесами ТЕС та АЕС / А. Х. Горелик. – Харків : НТУ "ХПІ", 2004. – 236 с.
6. Артюх С. Ф. Автоматизовані системи керування технологічними процесами в енергетиці / С. Ф. Артюх, М. А. Дуэль, І. Г. Шелепов. – Харків : Знання, 2001. – 416 с.
7. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (дата звернення 15.12.2023)
8. Оцінка енергетичної політики України в порівнянні з кращими європейськими практиками реалізації політики у сфері енергоефективності та відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] / Д. Вайс, В. Каленборн, Г. Брандл та ін. ; за ред. Д. Вайса. – Київ, 2014. – Режим доступу : http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf. (дата звернення 15.12.2023)
9. Халатов А. А. Энергетика Украины: сучасний стан та найближчі перспективи / А. А. Халатов // Вісник НАН України. – 2016. – № 6. – С. 53-61.
10. Анализ методов и моделей оптимального распределения нагрузок между энергогенерирующими объектами / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина, Д. И. Кухтин, В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша // Вестник НТУ «ХПИ»: Серия «Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование». – 2015. – № 16. – С. 117-123.
11. Unified basic software and hardware complex for precision energy-saving system of automatic regulation and control / G. Kanjuk, A. Mezerya, V. Kniazieva, D. Khoroshun, T. Fursova // Radio Electronics Computer Science Control. – 2019. – № 2. – С. 202-209.
12. Підвищення точності виміру та контролю параметрів систем паливopодачі парових котлів електростанцій // Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. В. Хоменко, Т. Ю. Васи́лець, Т. М. Фурсова // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 80-88.
13. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів / Г. І. Канюк, Т. М.

Фурсова, А. Ю. Мезеря, О. А. Долматов, С. О. Заїка, П. Р. Галинський // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2023. – Вип. 31. – С. 42-49.

14. Любчик Л. М. Коррекция автоматизированного расчета технико-экономических показателей энергоблока / Л. М. Любчик, Г. Л. Гринберг // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – Вип. 19.

15. A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants / Dario Torregrossa, Joachim Hansen, France scHernández-Sancho, Alex Cornelissen, George sSchutz, Ulrich Leopold // Applied Energy. – 2017. – Vol. 208. – P. 1430–1440.

16. Северин В. П. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2006. – № 19. – С. 145-150.

17. Olszewski P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps / Pawel Olszewski // Applied Energy. – 2016. – Vol. 17. – P. 527–539.

18. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Д. В. Михайский, И. П. Лаптинов, А. Р. Фокина. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.

19. Энергосберегающее управление и повышение технико-экономической эффективности насосных установок тепловых и атомных электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. Р. Фокина, Е. В. Лаптинова, И. П. Лаптинов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 3/8 (57). – С. 58-62.

Reference:

1. Demchenko, VA 2001, *Avtomatizatsiya i modelirovanie tehnologicheskikh protsessov AES i TES [Automation and modeling of technological processes of nuclear and thermal power plants]*, Astroprint, Odessa.

2. Aleksandrov, EV, Gorelik, AH & Rozenbaum, ID 2010, 'Displeynoe upravlenie v ASU TP atomnykh elektrostantsiy' [Display control in the ACS TP of nuclear power plants], *Energetika i elektrofikatsiya*, no 12, Pp. 30-35

3. Duel, MA 2006, *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya energoblokami teplovykh i atomnykh elektrostantsiy [Automated control systems for the power units of thermal and nuclear power plants]*, ChP "KiK", Harkiv.

4. Pletnev, GP 1995, *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya ob'ektami teplovykh elektrostantsiy [Automated control systems for the facilities of thermal power plants]*, Izd-vo MEI, Moskva.

5. Gorelik, AH 2004, *Avtomatizovani sistemi upravlinnya tehnologichnimi protsesami TES ta AES [Automated control systems for the technological processes of thermal power plants and nuclear power plants]*, NTU "HPI", Harkiv.

6. Artyuh, SF, Duel, SF & Shelepov, IG 2001, *Avtomatizovani sistemi keruvannya tehnologichnimi protsesami v energetitsi [Automated control systems for technological processes in the energy sector]*, Znannya, Harkiv.

7. Kabinet Ministriv Ukrayini n. d., *Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku: «Bezpeka, energoefektivnist, kon-kurentospromozhnist» [New Energy Strategy of Ukraine until 2035: 'Security, Energy Efficiency, Competitiveness']*, viewed 15 December 2023 <<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>>

8. Vays, D, Kalenborn, V, Brandl, G & Vaysa, D (ed) 2014, *Otsinka energetichnoy politiki Ukrayini v porivnyanni z kraschimi Evropeyskimi praktikami realizatsiyi politiki u sferi energoefektivnosti ta vidnovlyuvanoyi energetiki [Assessment of Ukraine's energy policy compared to the best European practices in implementing policies in the field of energy efficiency and renewable energy]*, Kyiv.

9. Halatov, AA 2016, 'Energetika Ukrayini: suchasniy stan ta nayblizhchi perspektivi' [Energy Sector in Ukraine: Current State and Near-Term Perspectives], *Visnik NAN Ukrayini*, no 6, Pp. 53-61.

10. Efimov, AV, Potanina, TV, Kuhtin, DI, Kavertsev, VL & Garkusha, TA 2015, 'Analiz metodov i modeley optimalnogo raspredeleniya nagruzok mezhdru energogeneriruyuschimi ob'ektami' [Analysis of methods and models for optimal load distribution among power generation facilities], *Vestnik NTU «HPI»: Seriya «Energeticheskie i teplotekhnicheskie protsessy i oborudovanie»*, no 16, Pp. 117-123.

11. Kanyuk, GI, Mezerya, A, Kniazieva, V, Khoroshun, D & Fursova, T 2019, 'Unified basic software and hardware complex for precision energy-saving system of automatic regulation and control' [Unified basic software and hardware complex for precision energy-saving system of automatic regulation and control], *Radio Electronics Computer Science Control*, no 2, Pp. 202-209.

12. Kaniuk, GI, Mezerya, A, Khomenko, V, Vasylets, T & Fursova, T 2022, 'Pidvyshchennia tochnosti vymiru ta kontroliu parametriv system palyvopodachi parovykh kotliv elektrostantsii' [Improving the accuracy of measurement and control of parameters in the fuel supply systems of steam boilers at power plants], *Mashynobuduvannia*, iss 29, Pp. 80-88.

13. Kaniuk, GI, Fursova, TM, Mezerya, AY, Dolmatov, OA, Zaika, SO & Halynskiy, PR 2023, 'Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti ta efektyvnosti obladnannya kotelnykh ustanovok teploelektrostantsii shliakhom pidvyshchennia yakosti vymiriuvan yikh tekhnolohichnykh parametriv' [Improving the operational reliability and efficiency of boiler equipment at thermal power plants by enhancing the quality of measurement of their technological parameters], *Mashynobuduvannia*, iss 31, Pp. 42-49.

14. Lyubchik, LM & Grinberg, GI 2006, 'Korrekttsiya avtomatizirovannogo rascheta tehniko-ekonomicheskikh po-kazateley energobloka' [Correction of automated calculation of technical and economic indicators of power units],

Visnik Natsionalnogo tehnicnogo unive-rsitetu «Harkivskiy politehnicniy Institut». Tematicniy vipusk: Sistemniy analiz, upravlinnya ta Informatsiyi tehnologiyi, iss 19.

15. Torregrossa, D, Hansen, J, scHernández-Sancho, F, Cornelissen, A, sSchutz, G & Leopold, U 2017, 'A data-driven methodology to support pump performance analysis and energy efficiency optimization in Waste Water Treatment Plants', Vol. 208, Pp. 1430–1440.

16. Severin, VP & Nikulina, EN 2006, 'Matematicheskoe modelirovanie parogenerators atomnogo energobloka' [*Mathematical modeling of a steam generator of a nuclear power unit*], *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «Harkivskiy politehnicniy Institut»*, no 19, Pp. 145-150.

17. Olszewski, P 2016, 'Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps', *Applied Energy*, Vol. 17, Pp. 527–539.

18. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Mihayskiy, DV, Laptinov, IP & Fokina, AR 2012, *Rezervyi energosberegayuschego upravleniya tehnologicheskimi protsessami na deystvuyuschih TES i AES* [*Reserves of energy-saving control of technological processes at operating TPPs and NPPs*], Tochka, Harkov.

19. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Fokina, AR, Laptinova, EV & Laptinov, IP 2012, 'Energosberegayuschee upravlenie i povyshenie tehniko-ekonomicheskoy effektivnosti nasosnykh ustanovok teplovykh i atomnykh elektrostantsiy' [*Energy-saving control and improvement of the technical and economic efficiency of pumping units at thermal and nuclear power plants*], *Shidno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy*, no 3/8 (57), Pp. 58-62.

Стаття надійшла до редакції 17 грудня 2023 року.

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

© Князєва В.М., Насиров С.В., Малюта В.Є., Курільченко М.О., Колесник В.Б.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Князєва Вікторія Миколаївна (Kniazieva Viktoriia): ORCID:0000-0002-3106-4897; email: vitok911@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Насиров Сергій Володимирович (Nasyrov Serhii): ORCID:0000-0002-9599-8306; e-mail: nasirov1980@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Малюта Віталій Євгенович (Maliuta Vitalii): ORCID:0009-0004-0789-442X; e-mail: Sony199325@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Курільченко Максим Олександрович (Kurilchenko Maksym): e-mail: Maximkaa033@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Колесник Владислав Борисович (Kolesnyk Vladyslav): ORCID:0009-0007-3409-6062; e-mail: vladkole1994@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Визначено, що оптимальним режимом роботи магістральних газопроводів є максимальне використання їх пропускної спроможності (перекачування газу) при мінімальних витратах енергії на стиснення, охолодження і транспортування та визначається роботою компресорних станцій і характеризується нерівномірністю подачі та споживання газу. Перспективним напрямком удосконалення режимів роботи газопроводів є підтримування максимального розрахункового тиску газу в трубопроводі, знижування температури газу, що перекачується, шляхом його охолодження, а також використання газопроводів більшого діаметру з очищенням внутрішньої порожнини трубопроводу. Розглянуто розроблені принципи енергоефективного транспортування природного газу магістральними газопроводами на основі нормативно-технічних документів. Запропоновано спосіб магістрального транспорту газу, що забезпечує найвищу енергоефективність за будь-яких режимів роботи магістральних газопроводів. Це досягається тим, що температуру і тиск компримованого газу на виході на початку кожної лінійної ділянки вимірюють і автоматично регулюють за умови підтримання їх на оптимальному рівні згідно із завданням і значеннями зовнішніх збурень, що діють на параметри потоку газу в газопроводах. Наведено схему та сучасні технічні засоби частотно-регульованих електроприводів та алгоритми керування технологічними агрегатами компресорних станцій магістрального транспортування газу. Використання запропонованого способу магістрального транспорту газу забезпечує автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привод компресорів та вентиляторів.

Ключові слова: енергоефективність, магістральні газопроводи, компресорні станції з електроприводом, оптимальне управління технологічними агрегатами.

Kniazieva V., Nasyrov S., Maliuta V., Kurilchenko M., Kolesnyk V. “Improving the energy efficiency of gas transportation by optimizing the operation modes of electric drives”

The optimal mode of operation for trunk gas pipelines is determined to be the maximum utilization of their throughput capacity (gas transmission) with minimal energy consumption for compression, cooling, and transportation, and is defined by the operation of compressor stations and characterized by the unevenness of gas supply and consumption. A promising direction for improving the operation modes of gas pipelines is maintaining the maximum design pressure of gas in the pipeline, reducing the temperature of the transmitted gas by cooling it, as well as using pipelines with larger diameters with cleaning of the internal cavity of the pipeline. The developed principles of energy-efficient transportation of natural gas through trunk gas pipelines based on regulatory and technical documents are considered. A method of trunk gas transportation is proposed, which ensures the highest energy efficiency under any operating conditions of trunk gas pipelines. This is achieved by measuring and automatically adjusting the temperature and pressure of compressed gas at the outlet at the beginning of each linear section under the condition of maintaining them at an optimal level according to the task and the values of external disturbances acting on the parameters of the gas flow in the pipelines. A diagram and modern technical means of frequency-controlled electric drives and control algorithms for technological units of compressor stations for trunk gas transportation are provided. The use of the proposed method of trunk gas transportation ensures automatic stabilization of pressure and temperature of the gas at the outlet, thereby practically completely eliminating unacceptable deformations and stress states of the pipeline and possible destruction of its anti-corrosion insulation, which increases operational reliability and optimizes the integral energy costs for driving compressors and fans.

Key words: energy efficiency, trunk gas pipelines, compressor stations with electric drive, optimal control of technological units.

Постановка проблеми

Оптимальним режимом роботи магістральних газопроводів (МГ) є максимальне використання їх пропускної спроможності (перекачування газу) при мінімальних витратах енергії на стиснення, охолодження і транспортування. Значною мірою цей режим визначається роботою компресорних станцій (КС) і характеризується нерівномірністю подачі та споживання газу протягом року, місяця та доби, незважаючи на наявність газосховищ, а також науково обґрунтовані нормативні методи оптимізації [1, 2].

З метою зниження енергоспоживання компресорної станції для перекачування газу, збільшення пропускної здатності газопроводу і економії енергоресурсів вигідно підтримувати максимальний розрахунковий тиск газу в трубопроводі, знижувати температуру газу, що перекачується шляхом його охолодження, а також використовувати газопроводи більшого діаметру з очищенням внутрішньої порожнини трубопроводу [3].

Аналіз показників, що характеризують експлуатацію газопроводу країни на сьогоднішній день, свідчить про значну амортизацію, зниження технічного стану і продуктивності основних агрегатів компресорної станції [4]. Середній вік газопроводів в Україні становить 22 роки, більшість з яких (близько 80%) мають вік від 15 до 40 років, що перевищує нормативні показники.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останніми роками інтерес до проблем енергоефективності та енергозбереження на МГ значно зріс на рівні розроблення нових концепцій оптимального управління [5-8], реалізації інтелектуальних і малолюдних технологій функціонування [9-10], технічних рішень щодо застосування нової техніки, включно з високовольтними багаторівневими перетворювачами частоти [11, 12]. З'явилися перші реалізації подібних систем для основних технологічних установок КС (рис. 1) – електроприводних газоперекачувальних агрегатів (ЕГПА) і апаратів повітряного охолодження газу (АПО) [13, 14].

Всі вищезазначені фактори при системному впровадженні в рамках КС значно підвищують техніко-економічну привабливість і конкурентоспроможність ЕГПА, забезпечуючи виконання основних завдань енергоефективності та безпеки магістральних газопроводів, а також стійкості, надійності та екологічності транспортування енергоресурсів в Україні.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою даної роботи є удосконалення систем керування газоперекачувальними агрегатами та підвищення ефективності транспортування газу.

Виклад основного матеріалу

У комплексі засобів автоматизації компресорних цехів (КЦ) слід передбачати системи автоматичного регулювання, що забезпечують підтримання заданих величин тиску й температури газу на виході станції, пристрої антипомпажного регулювання й захисту газоперекачувальних агрегатів (ГПА) [15]. Однак наявні засоби автоматики здебільшого працюють автономно від агрегатів у ручному режимі, виконуючи здебільшого захисні функції, і не забезпечують енергоефективні режими [2,4]. Разом з тим, сьогодні можливості регульованого ЕГПА дають змогу оптимізувати енергоспоживання КЦ з автоматичним стеженням за обуреннями детермінованого та стохастичного характеру [16].



Рис. 1 - Варіанти нових моноблочних електроприводних газоперекачувальних агрегатів для енергоефективного транспорту газу

Запропоновано спосіб магістрального транспорту газу, що забезпечує найвищу енергоефективність за будь-яких режимів роботи магістральних газопроводів (рис. 2). Це досягається тим, що температуру і тиск компримованого газу на виході всіх КС на початку кожної лінійної ділянки МГ вимірюють і автоматично регулюють за умови підтримання їх на оптимальному рівні згідно із завданням і значеннями зовнішніх збурень, що діють на параметри потоку газу в газопроводах [17].

Порівняльний аналіз цього способу, який полягає у формуванні тиску й температури потоку стисненого газу по всій трасі МГ за допомогою ЕГПА та вентиляторів АПО, встановлених на всіх КС на початку кожної лінійної ділянки МГ, з аналогами показує, що запропонований спосіб магістрального транспорту газу відрізняється від відомих тим, що в ньому автоматично встановлюються та плавно регулюються величини тиску та температури газу за допомогою регульованих ЕГПА та АПО залежно від поточних значень тиску та температури газу в МГ, які вимірюють за допомогою ЕГПА і АПО залежно від поточного значення тиску та температури газу в МГ, що вимірюється з допомогою ЕГПА. Також величин збурювальних впливів стохастичного характеру і, тим самим, мінімізуються параметричні зміни тиску і температури газопроводу, що підвищує його експлуатаційну надійність, а також мінімізуються інтегральні енерговитрати на привід ЕГПА та вентиляторів АПО газу.

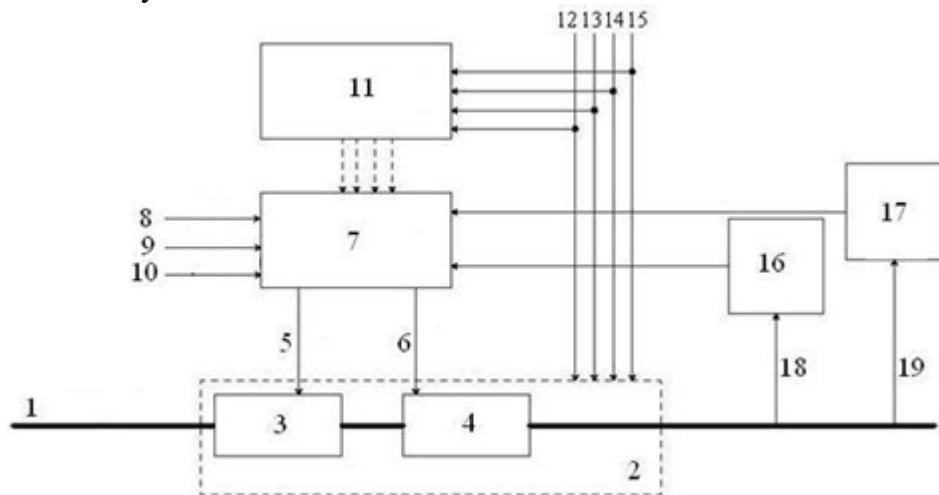


Рис. 2 - Структура енергоефективного транспорту газу через електроприводну компресорну станцію

1 – лінійна частина МГ, 2 – КС, 3 – ЕГПА, 4 – АПО газу, 5 і 6 – швидкості обертання приводів ЕГПА ($\omega_{\text{зад}} \text{ ЕГПА}$) і вентиляторів АПО, 7 – блок розрахунку параметрів регулювання, 8, 9, 10 – задані значення продуктивності, тиску і температури газу, 11 – датчики вимірювання зовнішніх впливів, 12 – вологість повітря (β), 13 – температура повітря (θ), 14 – перепад температур (Δt) або тисків на КС (ΔP), 15 – продуктивність КС (Q), 16 і 17 – датчики тиску і температури газу, що вимірюють 18 і 19 – реальні значення тиску і температури газу на виході КС

Як вихідний стан оптимізації необхідно вибрати інтервали значень змінних, що змінюються безперервно, і набори значень дискретних змінних. При цьому досягається мінімум цільової функції, яка має такий трифакторний вигляд:

$$G = \alpha \times R + \beta \times W + \gamma \times C, \quad (1)$$

де α , β і γ – вагові коефіцієнти, R – фактор "режиму", тобто мінімізації (максимізації) тиску в певних точках ГТС, як-от будь-які точки, розташовані вище й нижче КС або регулюючого вентиля, а також пристрої споживання газу, W – фактор "енергії" або мінімізації споживання

електроенергії на компримування газу та його охолодження в АПО перед подачею в газопровід, C – фактор "цілі", тобто максимізації (мінімізації) витрати газу на ділянці системи, розташованій між двома точками газопроводу, або тиску в певній точці з'єднання газопроводу або у певній точці з'єднання, або в певній точці газопроводу, або у точці з'єднання газопроводу, а також пристрої споживання газу, тобто максимізації (мінімізації) витрати газу на ділянці системи, розташованій між двома точками газопроводу, або тиску в певній точці з'єднання.

Зазначені обмеження містять обмеження рівності, до яких входять закон витрати напору в трубопроводах і перше правило Кірхгофа, що визначають розрахунки мереж, та обмеження нерівності, до яких входять обмеження на мінімальні та максимальні значення витрати газу, обмеження на мінімальний і максимальний тиск в активних або пасивних об'єктах і обмеження потужності ЕГПА КС.

Оптимальна конфігурація активних об'єктів КС моделюється у вигляді програми P оптимізації такого вигляду:

$$\begin{cases} \min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \cdot \|S\| \\ P = C_1(x) + \beta \cdot e \leq s_I \\ C_E(x) = s_E \end{cases} \quad (2)$$

де $x \in R^n$, $s_I \in R^p$, $s_E \in R^q$, $e \in \{0,1\}$, x – сукупність змінних витрати газу Q і тиску P , $G(x)$ – цільова функція, що являє собою економічний критерій оптимізації, $C_1(x)$ – сукупність p лінійних і нелінійних обмежень нерівності для активних об'єктів, β – вектор, коефіцієнти якого дорівнюють нулю або максимальним значенням обмежень, e – вектор двійкових змінних, $C_E(x)$ – сукупність q лінійних і нелінійних обмежень рівності, s – змінна відхилення, ненульове значення якої позначає порушення обмеження, α – коефіцієнт, відповідний допустимому ступеню порушення обмежень.

У результаті за заданої витрати газу 8 (рис. 2) тиск 19 і температура 18 газу на виході КС встановлюються і стабілізуються на заданому оптимальному з енергоспоживання КС рівні. Цей спосіб магістрального транспорту газу при цьому являє собою надійну і довговічну в експлуатації систему, що обмежує перевищення тиску і температури газу вище і нижче граничних значень.

Використання запропонованого способу керування магістрального транспорту газу забезпечує, порівняно з наявними способами, автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході КС, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привід ЕГПА та вентиляторів АПО газу магістральних газопроводів.

Для реалізації цієї енергоефективної технологічної схеми система електроприводу ЕГПА має бути частотно-регульованою та інваріантною до всіх параметрів-збурень детермінованого та стохастичного характеру [7, 12], тобто комбінованою САР (за відхиленням і збуренням) з негативним зворотним зв'язком за головним технологічним параметром – тиском газу на виході компресорної станції. Така система, розроблена за участю автора, показана на рис. 3.

Об'єктом управління для електроприводу 9 є газоперекачувальний агрегат 10, на вхід якого підводиться газ. Підвищення тиску (компримування) газу відбувається за рахунок політропної роботи компресорів ГПА. Обертання газоперекачувального агрегату 10 забезпечує двигун 9 із пристроєм зміни його частоти обертання (ПЧ) із законом керування $U/f^2 = \text{const}$ (U , f – напруга і частота напруги, що живить двигун). На вхід блока 3 розрахунку необхідної швидкості обертання надходять сигнали про величину впливів, що впливають на оберти, з датчиків 2 вимірювання зовнішніх впливів 1 і сигнал завдання тиску 5, який коригується з

датчика тиску 11. Динамічні коливання швидкості обертання електропривода ГПА 9 надходять на датчик швидкості обертання 6 і далі на другий вхід суматора 13. Сигнал 4 з виходу блока 3 розрахунку необхідної швидкості обертання електропривода ГПА надходить на суматор 13, де коригується сигналом з датчика швидкості 6. Сигнал із суматора 13 надходить на ПІ-регулятор 7, на виході якого формується сигнал 8, пропорційний необхідній швидкості обертання електропривода 9. Газоперекачувальний агрегат 10, що обертається електроприводом 9, створює необхідний тиск газу на виході компресорної станції 12.

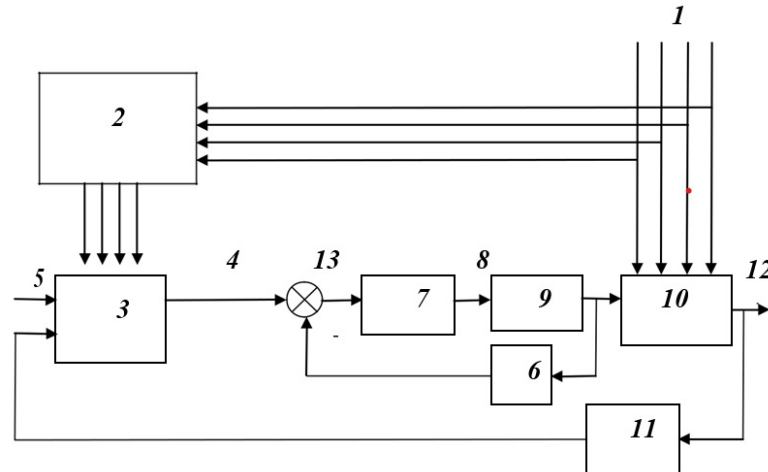


Рис. 3 - Структура інваріантної системи частотно-регульованого ЕГПА

Дана комбінована система, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), забезпечує автоматизацію процесу компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА. Цьому сприяє суворе дотримання параметрів основного технологічного процесу компримування газу, що дає змогу підвищити продуктивність і надійність газопроводу в умовах дії збурливих впливів [15, 16]. Дана комбінована система, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), забезпечує автоматизацію процесу компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА. Цьому сприяє суворе дотримання параметрів основного технологічного процесу компримування газу, що дає змогу підвищити продуктивність і надійність газопроводу в умовах дії збурливих впливів [15, 16].

За необхідності переведення ЕГПА в турбодетандерний режим роботи необхідно забезпечувати на виході ПЧ параметри напруги за допомогою введення зовнішнього негативного зворотного зв'язку за вихідною напругою, як це виконано в роботах [15, 17].

Висновки

1. Розроблено структурну схему реалізації енергоефективної технологічної схеми система електроприводу ЕГПА. Привід частотно-регульований та інваріантний до всіх параметрів-збурень детермінованого та стохастичного характеру, тобто САР є комбінована (за відхиленням і збуренням) з негативним зворотним зв'язком за головним технологічним параметром – тиском газу на виході компресорної станції.

2. Наведено комбіновану систему, що складається з САР за відхиленням (тиску газу) і САР за збуренням (стохастичних збурень), що забезпечує автоматизацію процесу

компримування газу до оптимального стабільного тиску в умовах різних випадкових впливів засобами інваріантної системи керування частотно-регульованого ЕГПА. При цьому вирішується шукане завдання підвищення точності відпрацювання необхідної величини тиску газу на виході КС і стабілізації процесу компримування газу засобами ЕГПА.

3. Використання запропонованого способу керування магістрального транспорту газу забезпечує, порівняно з наявними способами, автоматичну стабілізацію тиску й температури газу на виході КС, і тим самим практично повністю усуває неприпустимі деформації та напружені стани трубопроводу й можливі руйнування його протикорозійної ізоляції, унаслідок чого підвищується експлуатаційна надійність, а також оптимізуються інтегральні енерговитрати на привод ЕГПА та вентиляторів АПО газу магістральних газопроводів.

Список використаних джерел:

1. Анализ резервов энергосбережения при управлении насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций Украины / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. В. Андреев, В. Н. Князева и др. // *Интегрированные технологии та энергосбережения*. – 2015. – № 4. – С. 3-14.
2. Аналіз засобів регулювання параметрів насосних агрегатів магістральних нафтопроводів України / Г. І. Канюк, А. В. Андреев, А. М. Чернюк, В. М. Князева та ін. // *Вісник НТУ “ХП”*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків, 2016. – № 10 (1182). – С. 85-91.
3. Бабенко І. А. Удосконалення та уніфікація методів забезпечення енергоефективних режимів роботи нагнітальних установок електростанцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харків, 2017.
4. Андреев А. В. Эффективность управления насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций / А. В. Андреев, А. М. Чернюк, В. Н. Князева // *Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання : тез. доп. XVI Міжнар. наук.-техн. конф., 10–14 верес. 2017 р. / НАН України, Ін-т проблем машинобудування ім. А. Н. Підгірного НАН України, Турбоатом, Енергопрогрес*. – Харків, 2017. – С. 94-95.
5. Unified basic software and hardware complex for precision energy saving systems of automatic regulation and control / G. I. Kaniuk, A. Yu. Mezeria, V. M. Kniazeva, D. M. Khoroshun, T. N. Fursova // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2019. – № 2. – С. 202-209.
6. Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation / G. I. Kaniuk, A. Yu. Mezeria, V. M. Kniazeva, T. N. Fursova, E. N. Blyznychenko // *Problems of the regional energetics*. – 2021. – № 4. – Р. 13-22.
7. Канюк Г. И. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. П. Лаптинов // *Вісник НТУ “ХП”*: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 12. – С. 90-97.
8. Чернюк А. М. Повышение уровня энергосбережения при управлении насосными установками нефтеперекачивающих станций / А. М. Чернюк, В. М. Князева // *Информатика, математика, автоматика : материалы науч.-техн. конф.* – Сумы, 2016.
9. Сабанин В. Р. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления / В. Р. Сабанин, Н. И. Смирнов, А. И. Репин // *Exponents Pro. Математика в приложениях*. – 2004. – № 3/4. – С. 78-85.
10. Шаммазов А. М. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций / А. М. Шаммазов, В. Н. Александров, А. И. Гольянов. – М. : Недра, 2003. – 404 с.
11. Нефтяные магистральные насосы: параллельное или последовательное включение на НПС / И. Б. Твердохлеб, Г. В. Визенков, А. И. Бирюков, Л. М. Беккер // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 2. – С. 17-19.
12. Шабанов В. А. Снижение волн давления в нефтепроводе при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов / В. А. Шабанов, О. В. Кабаргина, З. Х. Павлова // *Вестник Атырауского института нефти и газа*. – 2011. – № 1(24). – С. 71–76.
13. Bachus L. Know and understand centrifugal pumps / L. Bachus, A. Custodio. – Kidlington, Oxford: UK, 2003. – 265 p.
14. Benra F. K. Measurement of the characteristics of a centrifugal pump: Practical course Turbomachinery / F. K. Benra. – University Duisburg-Essen. – 42 p.
15. Перекрест А. Л. Системы активного регулирования параметров насосных комплексов : монография / А. Л. Перекрест, Т. В. Коренькова, Д. И. Родькин. – Кременчуг : ЧП Щербатых А.В. – 2011. – 180 с.
16. Samolenkov S. V. Determination of the mode working parameters of centrifugal pumps reducing the energy consumption during oil transportation / S. V. Samolenkov, O. V. Kabanov // *Scientific Reports on Resources Issues Freiberg: Technical University Bergakademie*. – 2012. – p. 260-263.
17. Шабанов В. А. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения затрат электроэнергии / В. А. Шабанов, Э. Ф. Хакимов, С. Ф. Шарипова // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. – 2013. – № 2 (9). – С. 34–42.

References:

1. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Andreev, AV, Knyazeva, TM et al 2015, 'Analiz rezervov energosberezheniya pri upravlenii nasosnyimi agregatami nefteperekachivayuschih stantsiy Ukrainyi' [*Analysis of energy saving reserves in the control of pump units of oil pumping stations in Ukraine*], *Schokvartalni naukovopraktichnyi zhurnal NTU «HPI» Integrovani tehnologiyi ta energosberezheniya*, no 4, Pp. 3-14.
2. Kanyuk, GI, Andreev, AV, Chernyuk, AM, Knyazeva, TM et al 2016, 'Analiz zasobiv reguluvannya parametriv nasosnih agregativ magistralnih naftoprovodiv Ukrainyi' [*Analysis of means for regulating parameters of pump units of main oil pipelines in Ukraine*], *Visnik NTU «HPI»: Vipusk: Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya*, no 10, Pp. 85-91.
3. Babenko, IA 2017, 'Udoskonalennya ta unifikatsiya metodiv zabezpechennya energoefektivnih rezhimiv roboti nagnitalnih ustanovok elektrostantsiy' [*Improvement and unification of methods of ensuring energy-efficient operating modes of supercharger units of power plants*], *Kand. tehn. n. abstract*, Harkiv.
4. Andreev, AV, Chernyuk, AM & Knyazeva, VM 2017, 'Effektivnost upravleniya nasosnyimi agregatami nefteperekachivayuschih stantsiy' [*Efficiency of control of pumping units of oil pumping stations*], *Udoskonalennya turbostanovok metodami matematichnogo i fizichnogo modelyuvannya: tez. dop. HVI Mizhnar. nauk.-tehn. konf., 10–14 veresnya 2017 r.*, Harkiv, Pp. 94-95.
5. Kaniuk, GI, Mezerya, AY, Knyazeva, VM, Khoroshun, DM & Fursova, TM 2019, 'Unified basic software and hardware complex for precision energy saving systems of automatic regulation and control' *Radioelektronika, Informatika, upravlinnya*, no 2, Pp. 202-209.
6. Kaniuk, GI, Mezerya, AY, Knyazeva, VM, Fursova, TM & Blyznychenko, EN 2021, 'Energy Efficient Control by the Group of Oil Pumping Stations Operation', *Problems of the regional energetics*, no 4, Pp. 13-22.
7. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Laptinov, IP 2014, 'Model energosberegayuschego upravleniya nagnetatelnyimi ustanovkami teplovyyh elektrostantsiy' [*Model of energy-saving control of supercharger units at thermal power plants*], *Visnik NTU «HPI»: Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya*, no 12, Pp. 90-97.
8. Chernyuk, AM & Knyazeva, VM 2016 'Povyishenie urovnya energosberezheniya pri upravlenii nasosnyimi ustanovkami nefteperekachivayuschih stantsiy' [*Increasing the level of energy saving when controlling pumping units of oil pumping stations*], *Informatika, matematika, avtomatika : naukovotehnichna konferentsiya*, Sumi.
9. Sabanin, VR, Smirnov, NI & Repin, AI 2004, 'Modifitsirovannyi geneticheskiy algoritm dlya zadach optimizatsii i upravleniya' [*Modified genetic algorithm for optimization and control problems*], *Exponents Pro. Matematika v prilozheniyah*, no 3/4, Pp. 78-85.
10. Shammazov, AM, Aleksandrov, AM & Golyanov, AI 2003, *Proektirovanie i ekspluatatsiya nasosnykh i kompressornykh stantsiy* [*Design and operation of pump and compressor stations*], Nedra, Moskva.
11. Tverdohleb, IB, Vizenkov, GV, Biryukov, AI & Bekker, LM 2011, 'Neftyanye magistralnye nasosy: parallelnoe ili posledovatelnoe vklyuchenie na NPS' [*Oil main pumps: parallel or series connection at oil pumping stations*], *Nauka i tehnologii truboprivodnogo transporta nefi i nefteproduktov*, no 2, Pp. 17-19.
12. Shabanov, VA, Kabargina, OV & Pavlova, ZH 2011, 'Snizhenie voln davleniya v nefteprovode pri chastotno-reguliruемом электроприводе магистральных насосов' [*Reduction of pressure waves in an oil pipeline with variable-frequency electric drive of main pumps*], *Vestnik Atyirauskogo instituta nefi i gaza*, no 1, Pp. 71-76.
13. Bachus, L & Custodio, A 2003, *Know and understand centrifugal pumps*, Kidlington, Oxford.
14. Benra, FK n. d., *Measurement of the characteristics of a centrifugal pump: Practical course Turbomachinery*, University Duisburg-Essen.
15. Perekrest, AL, Korenkova, TV & Rodkin, DI 2011, *Sistemyi aktivnogo regulirovaniya parametrov nasosnykh kompleksov* [*Systems for active control of parameters of pumping complexes: monograph*], ChP Scherbatyih A.B., Kremenchug.
16. Samolenkov, SV & Kabanov, OV 2012, 'Determination of the mode working parameters of centrifugal pumps reducing the energy consumption during oil transportation' *Scientific Reports on Resources Issues Freiberg: Technical University Bergakademie*, Pp. 260-263.
17. Shabanov, VA, Hakimov, EF & Sharipova, SF 2013, 'Algoritm otsenki effektivnosti chastotno-reguliruемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию snizheniya zatrat elektroenergii' [*Algorithm for evaluating the efficiency of the frequency-regulated electric drive of main pumps of operated oil pipelines according to the criterion of reducing electricity costs*], *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekisy i sistemy*, no 2, Pp. 34-42.

Стаття надійшла до редакції 24 грудня 2023 року.

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА ПРИ ПОШКОДЖЕННІ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ

© Мельников В. Є.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Мельников В'ячеслав Євгенович (Melnykov Viacheslav): ORCID: <https://orcid.org/0000-000-6427-6805>; e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com, кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті проведено дослідження чинників і причин, що спричиняють пошкодження поверхні фотоелектричного модуля та їх вплив на характеристики сонячних елементів. Проаналізовані різні види пошкоджень поверхні фотоелектричного модуля та причини їх виникнення. Серед пошкоджень фотоелектричних модулів найбільш поширені: сліди від пропалу на лицевій та задній панелі, зміна кольору герметика, розшарування мультикристалічного модуля, електрохімічна корозія тонкоплівкового модуля, прогар етиленвінілацетної плівки в різних частинах комірки, розшарування заднього листа та розбиття тонкоплівкового скла фотоелектричного модуля. Відзначено, що при тривалій експлуатації фотоелектричних модулів відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності. Виявлено, що пошкодження поверхні фотоелектричного модуля виникають в наслідок екстремальних погодних умов: граду, вітру, температури; виробничого браку; неправильної експлуатації; зношування та деградації сонячних елементів протягом часу. Проведено аналіз видів деградації фотоелектричного модуля та її наслідки. Показано, що деградація виникає внаслідок хімічних реакцій між активними металами у складі фотоелектричного модуля, екстремальних погодних умов: різких перепадів температур, вологості, постійного змерзання або відтавання. Виявлено, що деградація призводить до зменшення провідності струму фотоелектричного модуля, появи паразитного опору фотомодуля, виникнення тріщин, мікропор та неоднорідностей на поверхні фотоелектричного модуля. Запропоновані заходи, які попереджають появу дефектів на усіх стадіях виробництва, монтажу та доставки фотоелектричних модулів. До таких заходів відносяться: вибір фотоелектричних модулів для спорудження сонячної станції, серед відомих виробників; здійснення ремонтних робіт на фотоелектричних модулях у спеціалізованих фірмах; організація регулярного технічного огляду фотоелектричних модулів; моніторинг параметрів фотоелектричних модулів в процесі експлуатації; дотримання головних правил експлуатації фотоелектричних модулів.

Ключові слова: фотоелектричний модуль, сонячний елемент, поверхня фотоелектричного перетворювача, фотоелемент, сонячна енергія, коефіцієнт корисної дії сонячного елемента.

Melnikov V. “Study of characteristics of a solar cell when damaging the surface of a photovoltaic module”

The article examines the factors and causes leading to damage to the surface of a photovoltaic module and their impact on the characteristics of solar elements. Various types of surface damage to photovoltaic modules and the reasons for their occurrence are analyzed. Among the most common damages to photovoltaic modules are: traces of burning on the front and back panels, color change of

sealant, delamination of multicrystalline modules, electrochemical corrosion of thin-film modules, burning of ethylene vinyl acetate film in different parts of the cell, delamination of the backsheet, and breakage of thin-film glass of the photovoltaic module. It is noted that during prolonged operation of photovoltaic modules, there is a significant decrease in their productivity due to deterioration of key parameters: the efficiency coefficient and output power. It has been found that surface damage to photovoltaic modules occurs due to extreme weather conditions such as hail, wind, and temperature; manufacturing defects; improper operation; wear and degradation of solar elements over time. An analysis of types of photovoltaic module degradation and its consequences is conducted. It is shown that degradation occurs due to chemical reactions between active metals in the photovoltaic module, extreme weather conditions such as sharp temperature fluctuations, humidity, constant freezing and thawing. It has been revealed that degradation leads to a decrease in the current conductivity of the photovoltaic module, the appearance of parasitic resistance of the photomodule, the occurrence of cracks, micropores, and surface irregularities on the photovoltaic module. Measures to prevent the appearance of defects at all stages of production, installation, and delivery of photovoltaic modules are proposed. These measures include: selection of photovoltaic modules for the construction of a solar station from reputable manufacturers; carrying out repair work on photovoltaic modules in specialized companies; organization of regular technical inspection of photovoltaic modules; monitoring of photovoltaic module parameters during operation; adherence to the main rules for operating photovoltaic modules.

Key words: photovoltaic module, solar cell, photovoltaic converter surface, photoelement, solar energy, solar cell efficiency coefficient.

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

При тривалій експлуатації фотоелектричних модулів (ФЕМ), відзначається значне зниження їхньої продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії й вихідної потужності [1, 2]. Так, по оцінці закордонних фахівців [3], близько 90% ринку фотоелектричних модулів, у цей час, становлять кристалічні кремнієві фотоелектричні модулі, які втрачають від 10% до 40% вихідної потужності, у перші два роки експлуатації.

Тому, необхідно враховувати такі зовнішні фактори, що впливають на продуктивність сонячної панелі, як нормальна деградація фотоелектричного модуля із часом, зниження потужності за рахунок надмірного нагрівання панелей або їхнього затінення й т.п. [4]. Вплив цих і інших факторів, може мінятися залежно від сезону, географічного положення, способу монтажу, азимута й нахилу фотоелектричного модуля [5]. Практика експлуатації фотоелектричних модулів показує, що в реальних умовах, фотоелектричний модуль буде виробляти близько 75...85% від її пікової потужності, зазначеної виробником. Наприклад, фотоелектричний модуль з потужністю 100 Вт, розташований під оптимальним кутом і орієнтований на південь, буде видавати влітку в середньому 75...85 Вт, залежно від методу установки. Тому, при проектуванні сонячної електростанції і зборці фотоелектричних модулів, необхідно враховувати реальні характеристики фотоелектричного модуля.

На сьогоднішній день дуже багато уваги приділяється відновлювальним джерелам енергії, оскільки закінчуються запаси традиційних викопних джерел енергії: вугілля, газу, нафти. У майбутньому видобуток традиційних джерел енергії буде дуже дорогим, через те, що енергетичним компаніям треба буде використовувати більш складніші і дорогі технології видобутку ресурсів [1]. Враховуючи ці проблеми є актуальним дослідження характеристик та режимів роботи відновлювальних джерел енергії, особливе місце серед яких займає сонячна енергетика. Сонячна енергія є одним з найдоступнішим джерелом енергії. Саме тому вже зараз можна спостерігати великі фінансові вкладення енергетичних компаній у розвиток сонячної енергетики [4].

Серед основних причин різкого падіння генерації енергії на сонячній станції пошкодження фотоелектричних модулів. При цьому далеко не завжди вони можуть бути спричинені втручанням людини, а спричинені впливом навколишнього середовища. До зовнішніх природних факторів, які можуть спричинити пошкодження фотоелектричних модулів відносяться: град, підвищена температура, тощо. Дію навколишнього середовища на фотоелектричний модуль неможливо зменшити, оскільки ефективних методів впливу на природні явища не існує. Тому дослідження впливу пошкоджень поверхні фотоелектричних модулів на характеристики сонячних елементів є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженням впливу пошкоджень фотоелектричних модулів на їх параметри присвячено багато робіт [3-15]. В роботі [1] досліджується вплив різних параметрів, характеристик та факторів на ефективність та надійність сонячних елементів у складі фотоелектричних модулів. Автори роблять висновок, що такі фактори, як затінення, пошкодження та перегрівання мають критичні наслідки, що погіршують ефективність роботи сонячних елементів. В роботі [2] розглядається вплив локальних неоднорідностей, мікротріщин та мікропор на стабільність та ефективність роботи сонячних елементів. Автори приходять до висновку, що при розрахунку номінальної потужності та ефективності сонячних елементів потрібно враховувати реальну площу сприймаючої поверхні сонячного елемента.

У роботі [15] показано, що на вихідну потужність фотоелектричних модулів впливають різні фактори, такі як затінення, сонячна інсоляція, температура і конфігурація ФЕМ. Ці фактори, викликають зниження ефективності та надійності вироблення електроенергії у ФЕМ. В роботі проведено дослідження впливу неоднорідного часткового затінення на показники ФЕМ. За цих умов, фотоелектричні вольт-амперні характеристики ФЕМ стають складнішими. Тому, дуже важливо за цих умов розрахувати максимально можливу потужність. Для цього у роботі [15] використовувалося моделювання характеристик ФЕМ на основі Matlab. Як недолік, у роботі наголошується, що в умовах часткового затінення зменшуються струм навантаження та теплові втрати, проте не досліджено причини такого зниження стану поверхні ФЕМ.

Метою роботи є аналіз впливу пошкоджень поверхні фотоелектричних модулів на зміни характеристики сонячного фотоелемента. За допомогою даного дослідження можна оцінити вплив пошкоджень на характеристики сонячного елемента, а саме струм короткого замикання, напруги холостого ходу, ККД. При пошкодженнях фотоелектричних модулів відбувається зменшення її ККД, що впливає на ефективність та стабільність її роботи. Тому дослідження впливу пошкодження фотоелектричних модулів є актуальною проблемою.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення максимальної потужності фотоелектричних модулів, необхідно забезпечити відповідні умови експлуатації, для цього необхідно розміщувати ФЕМ під певним кутом нахилу, щоб установка знаходилася під прямим та постійним сонячним світлом протягом року [1].

Причиною зниження потужності та генерації фотоелектричних модулів є пошкодження її поверхні. Причиною цього може бути: екстремальні погодні умови (град, вітер, підвищена температура), виробничий брак, неправильна експлуатація, зношування та деградація ФЕМ протягом певного часу.

До деградації ФЕМ відноситься зменшення виробництва електроенергії фотоелектричними модулями через фізичні зміни в її структурі. Процес деградації може відбуватися поступово протягом терміну експлуатації, в результаті чого результуюча потужність фотоелектричних модулів буде знижуватися. Але цей процес може бути прискорений через вплив зовнішніх і внутрішніх чинників.

Причиною прискореної деградації сонячних елементів може стати натрій чи інші активні метали, які є в складі матеріалів, з яких виготовлений ФЕМ, і це призводить до зменшення провідності струму фотоелектричного модуля. Також іншою причиною деградації може бути екстремальна погода: різкі перепади температури, вологість, цикли замерзання або відтавання фотоелемента, що часто повторюються. Зовнішні фактори підсилюють паразитний опір ФЕМ, який розсіює потужність і таким чином зменшує загальну ефективність генерації електроенергії у фотоелектричних модулях.

Зменшення виробництва електроенергії фотоелектричними модулями може бути спричинено наступними факторами.

1. Фотоелектричні модулі з часом починають зменшувати первинну потужність та продуктивність сонячної електростанції через активність ультра-фіолетового випромінювання та впливу екстремальних погодних умов. Якщо активність УФ-випромінювання не надто висока, то процеси зниження продуктивності фотоелектричних модулів сповільнюються.

До кліматичних умов, що мають вплив на термін експлуатації фотоелектричних модулів, можна віднести: високі температури повітря при експлуатації фотоелектричного модуля; сильні опади(град) , які можуть пошкодити сонячну батарею; замерзання води на поверхні захисного скла.

2. Тріщини на фотоелектричних модулях.

3. Відокремлення ламінуючої плівки від сонячного елемента.

4. Розгерметизація загартованого скла.

5. Деформація фотомодуля під дією погодних умов та зовнішніх механічних пошкоджень.

Оскільки основним елементом фотоелектричних модулів в якому відбувається перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію є фотоелектричний перетворювач, тому при впливі на його поверхню зовнішніх і внутрішніх чинників, в ньому відбуваються фізичні процеси, які призводять до утворення дефектів у виді: локальних неоднорідностей, мікропор, мікро і макротріщин [2,5].

У роботі [8] наведені виміри потужність сонячних модулів після 7 років експлуатації

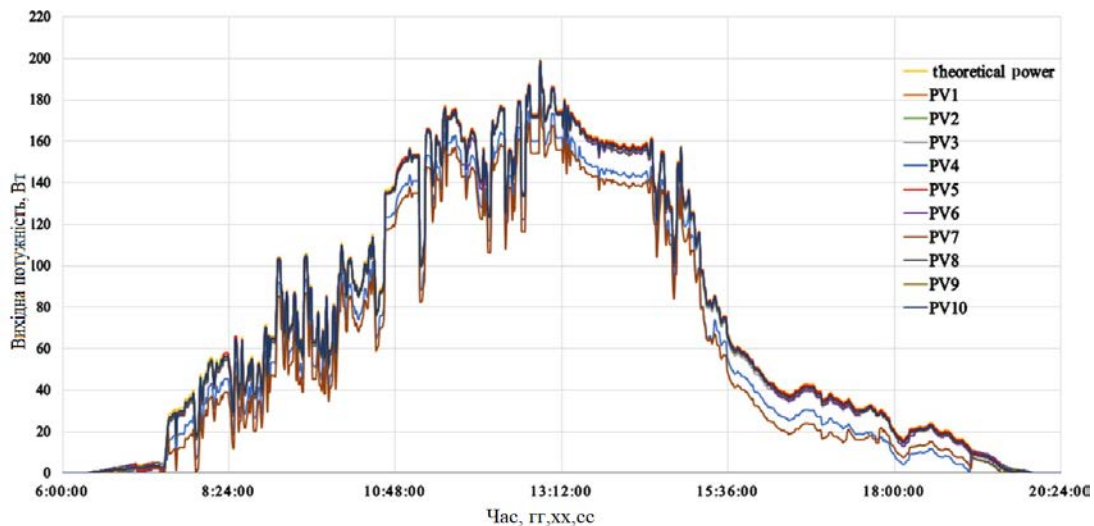


Рис.1 – Вимірjana вихідна потужність фотоелектричних модулів, порівняно з теоретичною вихідною потужністю[8]

Неможливо простежити весь процес вироблення, монтажу та доставки фотоелектричних модулів. Наприклад порушення умов монтажу може призвести до зниження роботи сонячної станції.

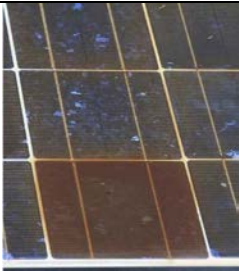
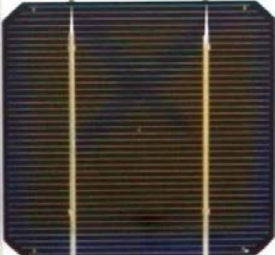
Щоб попередити появу дефектів на усіх стадіях виробництва, монтажу та доставки фотоелектричних модулів необхідно:

- вибирати фотоелектричні модулі серед відомих виробників та здійснювати ремонтні роботи на фотоелектричних модулях у спеціалізованих фірмах;
- регулярно організовувати своєчасний технічний огляд та аналізувати якість роботи фотоелектричних модулів;
- додержуватися головних правил експлуатації та слідкувати за приладами та обладнанням.

В таблиці 1 наведено характерні пошкодження фотоелектричних модулів в процесі експлуатації.

Таблиця 1. Пошкодження поверхні фотоелектричних модулів в процесі експлуатації

Опис	Зображення	Вплив пошкоджень на параметри фотоелектричних модулів
Сліди від пропалу на задній панелі внаслідок нагрівання вздовж шини		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Сліди пропалу поверхні, зміна кольору герметика, пов'язана з перегрівом уздовж металевих з'єднань		Впливає на опір
Розшарування мультикристалічного модуля		Впливає на потужність напругу та стум
Розшарування c-Si модуля		Впливає на потужність напругу та стум
Електрохімічна корозія фотомодуля, яке спричинило розшарування		Впливає на потужність напругу та стум
Пригоріла етиленвінілацетатна плівка в центрі сонячного елемента		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля

Підвищене нагрівання сонячного елемента, що спричинило зміну кольору сонячного елемента на коричневий		Впливає на потужність, опір, напругу та струм
Прогар етиленвінілацетатної плівки на верхній частині сонячного елемента з двома тріщинами в комірці.		Впливає на потужність та опір
Зміна кольору срібної пасти, яка використовується для ліній сітки на сонячному елементі, зміна кольору з'являється вздовж тріщин комірки.		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Розшарування заднього листа		Суттєво не впливає на характеристики фотоелектричного модуля
Розбиття тонкоплівкового скла		Впливає на потужність напругу та струм

Висновки

В статті проаналізовані фактори та причини пошкодження фотоелектричних модулів в процесі експлуатації та показано їх вплив на основні характеристики фотомодуля. Проаналізовані різні види пошкоджень на поверхні фотоелектричних модулів та причини їх виникнення. Виявлено, що причинами пошкодження поверхні фотоелектричних модулів є: екстремальні погодні умови, виробничий брак, неправильна експлуатація, деградація фотомодулів протягом часу.

Відзначено, що при тривалій експлуатації фотоелектричних модулів відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності.

Список використаних джерел:

1. Глушко О. Параметри, характеристики і фактори, що впливають на ефективність та надійність роботи фотоелектричних перетворювачів у складі електроенергетичних систем / О. Глушко, С. Степенко // Технічні науки та технології. – 2021. – №. 1 (23). – С. 249-264.
2. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / Budanov P., Kyrysov I., Brovko K., Rudenko D., Vasiuchenko P., Nosyk A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 3/8(111). – P. 75-89.
3. Кирисов І. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів / І. Кирисов, П. Буданов // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип 29. – С. 104-117.
4. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах / Ю. С. Олійник // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2018. – № 29 (68). – С. 220-224.
5. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента / І. Г. Кирисов, П. Ф. Буданов, Е. О. Хом'як, К. Ю. Бровко // Вісник ВПІ. – 2022. – Вип. 1. – С. 35–38.
6. Jorgensen M. Stability/degradation of polymer solar cells / Jorgensen M., Norrman K., Krebs F. C. // Solar energy materials and solar cells. – 2008. – Т. 92, № 7. – P. 686-714.
7. The impact of cracks on photovoltaic power performance / Dhimish M., Holmes V., Mehrdadi B., Dales M. // Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2.2. – 2017. – P. 199-209.
8. Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements / Dhimish M., Holmes V., Dales M., Mehrdadi B. // Micro & Nano Letters. – 2017. – № 12(10). – P. 803-807.
9. Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells / Li Y., Huang W., Huang H., Hewitt C., Chen Y., Fang G., Carroll D. L. // Sol. Energy. – 2013. – Vol. 90. – P. 51-57.
10. Laudani A. High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms / Laudani A., Riganti Fulginei F., Salvini A. // Sol. Energy. – 2014. – Vol. 103. – Pp. 316-326.
11. Lineykin S. An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel / Lineykin S., Averbukh M., Kuperman A. // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2014. – Vol. 30. – Pp. 282-289.
12. Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models / Dongue S. B., Njomo D., Tamba J. G., Ebengai L. // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2012. – Vol. 2. – P. 612-619.
13. Cubas J. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior / Cubas J., Pindado S., Victoria M. // Power Sources. – 2014. – Vol. 247. – P. 467-474.
14. A new method for determining the characteristics of solar cells / Peng L., Sun Y., Meng Z., Wang Y., Xu Y. // Power Sources. – 2013. – Vol. 227. – P. 131-136.
15. A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox / Said S., Massoud A., Benammar M., Ahmed S. // Journal of Energy and Power Engineering. – 2012. – Vol. 6. – P. 1965-1975.
16. Cubas J. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function / Cubas J., Pindado S., Manuel C. // Energies. – 2014. – Vol. 7. – P. 4098-4115

References:

1. Glushko, O & Stepenko, S 2021, 'Parametri, harakteristiki i faktori, scho vplyvayut na efektyvnist ta nadiynist roboti fotoelektrichnih peretvoryuvachiv u skladi elektroenergetichnih sistem' [Parameters, characteristics, and factors influencing the efficiency and reliability of photovoltaic converters within electric power systems], *Tekhnichni nauki ta tekhnologiyi*, no 1 (23), pp. 249-264.
2. Budanov, P, Kyrysov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory' *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3/8(111), pp. 75-89.
3. Kirisov, I & Budanov, P 2022, 'Metodi doslidzhen poglinayuchoyi poverhni sonyachnih elementiv' [Methods for investigating the absorbing surface of solar cells], *Mashinobuduvannya*, iss. 29, pp. 104-117.
4. Oliyik, YuS 2018, 'Vikoristannya sonyachnih batarey u suchasniy umovah' [Using solar panels in modern conditions], *Vcheni zapiski Tavriyskogo natsionalnogo universitetu imeni V.I.Vernadskogo*. Seriya: Tekhnichni nauki, no 29, Pp. 220-224
5. Kirisov, IG, Budanov, PF, Hom'yak, EO & Brovko, KY 2008, 'Pidhodi ta vimogi do modelyuvannya strukturi napivprovodnikovogo sharu sonyachnogo elementa' [Approaches and requirements for modeling the structure of a semiconductor layer in a solar cell], *Visnik VPI*, iss. 1, Pp. 35–38.
6. Jorgensen, M, Norrman, K & Krebs, FC 2008, 'Stability/degradation of polymer solar cells', *Solar energy materials and solar cells*, vol. 92, no 7, pp. 686-714.
7. Dhimish, M, Holmes, V, Mehrdadi, B & Dales, M 2017, 'The impact of cracks on photovoltaic power performance', *Journal of Science: Advanced Materials and Devices 2.2*, pp. 199-209.

8. Dhimish, M, Holmes, V, Dales, M & Mehrdadi, B 2017, 'Effect of micro cracks on photovoltaic output power: case study based on real time long term data measurements', *Micro & Nano Letters*, no 12(10), pp. 803-807.
9. Li, Y, Huang, W, Huang, H, Hewitt, C, Chen, Y, Fang, G & Carroll, DL 2013, 'Evaluation of methods to extract parameters from current-voltage characteristics of solar cells', *Sol. Energy*, Vol. 90, P. 51-57.
10. Laudani, A, Riganti Fulginei, F & Salvini, A 2014, 'High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms', *Sol. Energy*, Vol. 103, Pp. 316-326.
11. Lineykin, S, Averbukh, M & Kuperman, A 2014, 'An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel', *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 30, P. 282-289.
12. Dongue, SB, Njomo, D, Tamba, JG & Ebengai, L 2012, 'Modeling of Electrical Response of Illuminated Crystalline Photovoltaic Modules Using Four- and Five-Parameter Models', *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, P. 612-619.
13. Cubas, J, Pindado, S & Victoria, M 2014 'On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior', *Power Sources*, Vol. 247, P. 467-474.
14. Peng, L, Sun, Y, Meng, Z, Wang, Y & Xu, Y 2013, 'A new method for determining the characteristics of solar cells', *Power Sources*, Vol. 227, P. 131-136.
15. Said, S, Massoud, A, Benammar, M & Ahmed, S 2012, 'A matlab/simulink based photovoltaic array model employing simpowersystems toolbox' *Journal of Energy and Power Engineering*, Vol. 6, P. 1965-1975.
16. Cubas, J, Pindado, S & Manuel, C 2014, 'Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function', *Energies*, Vol. 7, P. 4098-4115.

Стаття надійшла до редакції 12 січня 2024 року.

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ АЕС

© Овчаров О.О., Лисенко А.Я.
Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Овчаров Олександр Олександрович (Ovcharov Oleksandr): ORCID: 0009-0002-0764-4063; e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Лисенко Артем Ярославович (Lysenko Artem): ORCID: 0009-0007-3916-8029; e-mail: dagost@ukr.net, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянуто аспекти нормативного та науково-технічного забезпечення експлуатаційної безпеки атомних електростанцій в Україні. Проведено критичний аналіз наукової літератури та нормативних документів, який охоплює існуючі підходи до вирішення питань, пов'язаних з оцінкою ресурсу енергообладнання та прийняттям рішень щодо продовження термінів експлуатації. Під час вивчення наукової літератури проаналізовано розрахункові методи визначення ресурсу, з особливим акцентом на сучасні наукові праці, що стосуються переоцінки ресурсу та контролю технічного стану атомних електростанцій за різними параметрами. Стаття містить критичну оцінку національних нормативних документів, які використовуються для забезпечення безпечної експлуатації атомних станцій в цілому та їх окремих елементів. На основі проведеного аналізу виявлено коло проблемних завдань, які залишаються невирішеними до теперішнього моменту, особливо щодо наукового обґрунтування, ґрунтованого на вимогах нормативів для об'єктів із підвищеною небезпекою, та термінів експлуатації енергообладнання.

Ключові слова: нормативне забезпечення, атомна електростанція, якість, технічна діагностика, безпечна експлуатація, енергоефективність, продовження ресурсу.

Ovcharov O., Lysenko A. “Analysis of standards for safe operation and service life extension of NPPs”

The article deals with the aspects of regulatory, scientific and technical support of operational safety of nuclear power plants in Ukraine. A critical analysis of scientific literature and regulatory documents regarding existing approaches to addressing related to assessing the service life of power equipment and making decisions on extending its service life is conducted. In the course of studying the scientific literature, the authors analyze the calculation methods for determining the service life, with a special emphasis on modern scientific works related to the reassessment of the service life and monitoring of the technical condition of nuclear power plants by various parameters. The article contains a critical assessment of the national regulatory documents used to ensure the safe operation of nuclear power plants in general and their individual elements. Based on the analysis, the authors identify a number of problematic tasks that remain unresolved to date, especially with regard to scientific justification based on the requirements of standards for high-risk facilities and the service life of power equipment.

Keywords: regulatory support, nuclear power plant, quality, technical diagnostics, safe operation, energy efficiency, service life extension.

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

Експлуатація обладнання на атомних станціях передбачає підвищені вимоги безпеки, так як специфікою отримання електроенергії на атомних електростанціях (АЕС) є використання ядерного палива, що робить їх особливо небезпечними. Розрахунковий проєктом термін експлуатації енергоблоків АЕС становить 30 років, після цього терміну постає питання щодо подальшої експлуатації, а саме продовження ресурсу, чи зняття з експлуатації енергоблоку. Продовження термінів експлуатації АЕС пов'язано з підвищеними вимогами, які повинні бути обумовлені безпечною і надійною роботою. Нормативні та керівні документи повинні забезпечити якість, безпеку та економічність проведення робіт з оцінки технічного стану обладнання при продовженні ресурсу. Отже, для забезпечення експлуатаційної безпеки енергообладнання атомних електростанцій необхідно мати систему нормативної документації, яка відображатиме вимоги для ефективного менеджменту енергооб'єктом з урахуванням змін функціонування внаслідок впливу зовнішніх та внутрішніх факторів.

Економічні втрати від неправильно прийнятих рішень про припинення експлуатації конкретного енергоблоку АЕС або про необґрунтованість продовження призначеного ресурсу його обладнання значні та впливають на всю економіку країни. Тому для визначення залишкового ресурсу обладнання і можливості продовження термінів експлуатації енергообладнання необхідна розробка нових методів аналізу і розрахунків, що дозволяють в реальних умовах роботи обладнання отримати достовірні результати, особливо в сучасних умовах, коли є велика потреба в безпечній та енергоефективній роботі всіх енергоресурсів.

Розробка нормативного забезпечення оцінки технічного стану та обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації енергообладнання з урахуванням енергоефективності функціонування, що базується на нормативних документах України та рекомендаціях міжнародних організацій, не можливо без проведення критичного аналізу існуючої нормативної документації різних рівнів. Такий критичний аналіз дасть можливість виявити існуючі прогалини та невизначеності в існуючій нормативній базі та запропонувати конкретні зміни та доповнення для удосконалення оцінки технічного стану та продовження терміну експлуатації з урахуванням енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями удосконалення нормативного забезпечення енергетичної безпеки та ефективності з урахуванням різних підходів займаються дослідники як України, так і закордоном.

Завданням оцінка технічного стану та продовження терміну служби енергообладнання та різних носіїв енергоносіїв присвячено багато науково-технічних робіт. Оцінка технічного стану обладнання енергоблоків вимагає комплексного підходу. Така комплексна оцінка пропонується авторами визначення якості експлуатації трубопровідних систем з урахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану та сейсмічної стійкості [1-4]. В роботах наведені окремі аспекти технічної діагностики енергообладнання, що мають стати частиною комплексного нормативного забезпечення безпеки функціонування енергообладнання. Запропоновані методи дослідження, що базуються на розрахунках з використанням математичної моделі оцінки фактичного стану енергообладнання та порівняння результатів розрахунку, що дає можливість прогнозувати граничні параметри технічного стану та здійснювати моніторинг механічних властивостей, а також визначати залишковий ресурс конструкцій з урахуванням геотехнічних та сейсмотектонічних умов.

Для забезпечення безпеки понад проєктний термін та якості роботи енергообладнання необхідно створити ефективний механізм вивчення технічного стану, який би максимально

оптимізував його роботу, виходячи із сприятливого співвідношення економічних показників та безпеки. Такі підходи розкрито авторами у наукових дослідженнях [5-7]. Авторами пропонується ряд показників, що визначають безпеку та якість функціонування енергообладнання, які запропоновані як нормативні показники для відносної оцінки. Так, у роботах [5] пропонується систематизація енергообладнання за певними класами безпеки та на основі цього розробити різні підходи технічної діагностики для певного класу. В роботах [6, 7] пропонується визначити нормативні критерії оптимальності техніко-економічних показників на основі запропонованих підходів для оцінювання якості багатопараметричних об'єктів енергетики. В даному випадку, автори пропонують визначити критерій для оцінювання показників якості як загальної системи низькопотенційних комплексів АЕС, так і для конкретних об'єктів, такі як тепловиділяючі елементи реактора.

В дослідження [8-11] розглянуті міжнародні стандарти, що забезпечують якість проведення саме технічної діагности, оцінювання результатів, метрологічного супроводу цих досліджень, що є невід'ємною частиною комплексної стандартизації та дають змогу забезпечити достовірність отриманих результатів.

Іншим аспектом нормативного забезпечення, що розглядається в роботах [12-15] є сталий розвиток енергетичного сектору, що включає регулювання енергоефективності виробництва та використання енергії для забезпечення оптимального використання ресурсів, встановлення норм та обмежень для зменшення викидів газів, які впливають на зміну клімату, врахування в нормативах можливостей використання сучасних технологій для підвищення ефективності та управління енергосистемами, а головне забезпечення стійкості та безпеки енергетичних мереж, в тому числі у випадках кризових ситуацій.

Разом з тим є ряд невирішених питань, щодо комплексного нормативного забезпечення безпечної та енергоефективної роботи енергообладнання атомних електростанцій. Для виявлення та розробки рекомендацій необхідно провести критичний аналіз існуючих нормативних документів на міжнародному, національному та галузевому рівні.

Метою роботи є аналіз нормативного забезпечення безпеки та енергоефективності функціонування енергообладнання атомних електростанцій.

Виклад основного матеріалу

На сьогоднішній день Україна посідає сьоме місце у світі за обсягом виробництва атомної електроенергії та третє місце за часткою ядерної енергії в загальному енергетичному балансі країни. Атомні електростанції забезпечують 55% всього виробництва електроенергії в Україні. У порівнянні з іншими країнами, більше 25% енергобалансів тринадцяти країн світу залежать від атомної енергії. Зокрема, у Франції ядерна енергетика становить понад 70% енергобалансу, в Словаччині – більше 53%, а в Угорщині та Болгарії – понад 40%.

Атомні електростанції відносяться до об'єктів підвищеної небезпеки, тому всі роботи пов'язані з проектуванням, експлуатацією або ж зняттям з експлуатації їх обладнання виконуються у відповідності з нормативними документами Міністерства енергетики України та «Енергетичної стратегії України до 2035 року» місією якої є створення умов для сталого розвитку національної економіки через забезпечення доступу до надійних, стійких і сучасних джерел енергії [16]. Разом з Міністерством енергетики України, основним галузевим розробником нормативного забезпечення у сфері безпеки атомної енергетики є Національна енергогенеруюча компанія «Енергоатом», яка відповідно до власної «Комп'ютерної політики» [17] керується міжнародними стандартами, рекомендаціями міжнародної організації з атомного регулювання (МАГАТЕ) та чинними національним законодавством.

Нормативні вимоги до обладнання атомних електростанцій встановлюють підвищені стандарти, спрямовані на забезпечення безпечної експлуатації АЕС на протязі всього їхнього

терміну служби. Зараз завершуються розрахункові терміни експлуатації атомних станцій, що породжує питання щодо забезпечення безпечної роботи їх обладнання в період після завершення проектного терміну або можливого припинення експлуатації, що повинно бути науко-обґрунтовано з позиції енергоефективності та безпечності, та мати відповідні нормативні критерії та нормативну методологію.

Ключовою складністю у створенні безпечної роботи обладнання АЕС є оцінка його ресурсу, яка неможлива без проведення діагностики енергетичного обладнання за конкретними технічними показниками.

Продовження термінів експлуатації атомних електростанцій є складним процесом, що обумовлено високими вимогами, включаючи як нормативні, так і технічні аспекти, стосовно безпеки та надійності всіх компонентів енергетичного блоку. Нормативні та управлінські документи повинні гарантувати високу якість, безпеку та економічність проведення оцінки технічного стану обладнання під час продовження його експлуатаційного ресурсу.

Оцінка технічного стану та обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації енергетичного обладнання базується на нормативних документах України та рекомендаціях міжнародних організацій з атомного регулювання (МАГАТЕ). Стандарти у сфері безпеки МАГАТЕ (Міжнародної агенції з атомної енергії, IAEA) розподілені у кілька напрямків:

1. **Спеціальні вказівки з безпеки (Specific Safety Guides, SSG):** Документи, що надають конкретні вказівки та рекомендації з певних аспектів безпеки в ядерній галузі.
2. **Загальні інструкції з безпеки (General Safety Guides, GSG):** Документи, що містять загальні принципи та вказівки з безпеки, які застосовуються широко в різних аспектах ядерної діяльності.
3. **Особливі вимоги безпеки (Specific Safety Requirements, SSR):** Документи, що уточнюють конкретні вимоги та стандарти безпеки, які повинні бути дотримані в конкретних ситуаціях чи для конкретних типів ядерних об'єктів.
4. **Загальні вимоги безпеки (General Safety Requirements, GSR):** Документи, що визначають загальні принципи та вимоги безпеки, які є загальноприйнятними для різних аспектів ядерної безпеки.
5. **Основи безпеки (Safety Fundamentals, SF):** Документи, що встановлюють фундаментальні принципи та основи безпеки, на яких ґрунтується вся система стандартів та вказівок МАГАТЕ з атомної безпеки.

Ці різні напрямки стандартів МАГАТЕ взаємодіють для створення комплексної системи нормативів, спрямованої на забезпечення безпеки в ядерній галузі. Окрім цього можна виділити стандарти з управління старіння енергообладнання та продовження термінів експлуатації, такі як [18-21]. Разом з тим, окремих стандартів, що забезпечують ефективність функціонування обладнання, особливо при перепризначенні термінів експлуатації, або у позапроектні терміни експлуатації обладнання, як і нормативних показників в системі МАГАТЕ не має. Є окремі доробки, як то «Передові системи управління для підвищення надійності та ефективності атомних електростанцій», який розроблено у вигляді технічної документації (TECDOC Series) [22] та інші документи цієї серії.

Слід зазначити, що МАГАТЕ керується у своїй діяльності не тільки стандартами. Нормативну базу міжнародної організації з атомного регулювання складають також: технічні документи (як зазначалось вище), технічні звіти (Technical Reports Series), панельні дискусії та доповіді (Panel Proceedings Series), листи, тощо. Вся нормативна база має рекомендаційний характер, як сама міжнародна система стандартизації.

Також на міжнародному рівні розробкою стандартів у сфері забезпечення безпеки атомної енергетики займається Міжнародна електротехнічна комісія (IEC, МЕК). МЕК співпрацює з МАГАТЕ, та разом їх діяльність спрямована на безпечне, надійне та мирне

використання ядерних технологій і розробку глобальних стандартів безпеки для ядерної енергетики. Експерти Технічного комітету (ТК) 45 МЕК беруть участь у технічній робочій групі з контрольно-вимірвальних приладів та управління атомними електростанціями (TWG-NPPIC), яка була заснована МАГАТЕ в 1971 році з метою надання консультацій та сприяння дослідженням у галузі технологій атомних електростанцій, зокрема, інтерфейсів між людиною та системою.

Стандарти ІЕС ТС 45 охоплюють весь життєвий цикл ядерних електроенергетичних систем, від концепції до проектування, виробництва, випробувань, монтажу, введення в експлуатацію, експлуатації, технічного обслуговування, управління старінням, модернізації та виведення з експлуатації. Основна сфера діяльності МЕК - контрольно-вимірвальні прилади, системи управління та електроенергетичні системи, важливі для безпеки на об'єктах атомної енергетики. Ядерний сектор має власну добре розвинену філософію і методологію безпеки, тому публікації МЕК з безпеки враховують відмінності від загального підходу і надають директиви, специфічні для об'єктів, пов'язаних з ядерною енергією, з всеосяжним підходом до безпеки.

Відповідно до угоди ТК 45/МАГАТЕ, стандарти безпеки та захищеності ядерного сектору МЕК імплементують принципи та термінологію керівництв МАГАТЕ з безпеки та захищеності. Основна сфера діяльності включає контрольно-вимірвальну апаратуру, що використовується для моніторингу, контролю та функцій управління безпекою.

МЕК розробляє, як загальні стандарти (горизонтальні)[23], так і специфічні (вертикальні)[24]. Горизонтальні стандарти, також відомі як базові стандарти, не залежать від технології. Їх можна застосовувати в багатьох технічних галузях. Вертикальні стандарти призначені для задоволення конкретних технічних потреб. Кілька технічних комітетів (ТК) і підкомітетів (ПК) готують міжнародні стандарти, які захищають конкретні сфери і забезпечують безпеку промисловості та об'єктів критичної інфраструктури.

Робочі групи технічного комітету ТК45 мають дві підкомісії, які в свою чергу мають поділення за робочими групами (РГ), діяльність яких спрямовано на певний аспект стандартизації у сфері ядерної енергетики: датчики та методи вимірювання; вимірвальні прилади та системи керування: архітектура та системні аспекти; вимірювання спеціальних процесів та радіаційний моніторинг; функціональні основи та основи безпеки вимірвальних, керуючих та електроенергетичних систем; диспетчерські, людино-машинні інтерфейси та інженерія людського фактору; продуктивність та стійкість систем до зовнішніх впливів; управління старінням контрольно-вимірвальних приладів, управління та електроенергетичних систем на АЕС; електроенергетичні системи: архітектура та системні аспекти; штучний інтелект для ядерних об'єктів.

Так, наприклад РГ 7 «Функціональні основи та основи безпеки контрольно-вимірвальних приладів, систем управління та електроенергетичних систем» (WG7) розробляє і підтримує стандарти і звіти з окремих аспектів фундаментальних принципів для систем контрольно-вимірвальних приладів, управління та електроенергетики, важливих для безпеки ядерних установок (тобто електростанцій, ядерного паливного циклу і установок для поводження з відходами).

Стандарти, розроблені РГ7, розширюють стандарти та керівництва МАГАТЕ, в тому числі і настанови МАГАТЕ:

- SF-1 Фундаментальні принципи безпеки [25];
 - SSR-2/1 Безпека АЕС - проектування[26];
 - NS-R-4 Безпека дослідницьких реакторів[27];
 - NS-R-5 (Rev. 1) Безпека установок ядерного паливного циклу[28];
 - INSAG-10 "Поглиблений захист у сфері ядерної безпеки[29]
- і домагатися їх дотримання.

Стандарти, які будуть розроблені робочою групою WG7, також враховуватимуть інші керівництва МАГАТЕ, що стосуються, зокрема, контрольно-вимірювальних приладів, систем управління та електроенергетичних систем: SSG-39 "Проектування систем КВПіА для АЕС; SSG-34 «Проектування електроенергетичних систем для АЕС»; SSG-37 «Системи контрольно-вимірювальних приладів і керування та програмне забезпечення, важливе для безпеки дослідницьких реакторів», але не розглядатиме детальне проектування і пов'язані з ним питання, які є сферою діяльності інших робочих груп SC45A, головним чином, РГ А3 (Системи контролю і управління) і РГ А11 (Електроенергетичні системи).

Отже, завдання РГ7, таким чином, включає в себе:

- категоризація функцій безпеки
- загальні принципи класифікації контрольно-вимірювальних приладів, систем управління та електроенергетичних систем, важливих для безпеки, та вимоги до розподілу функцій;
- глибинний захист;
- відмова в обслуговуванні при поодиноких відмовах;
- захист від відмов за загальною причиною (включаючи систематичні відмови) та впровадження таких методів, як розділення, диверсифікація та ізоляція для досягнення незалежності та захисту від внутрішніх і зовнішніх небезпек, а також від випадкових і систематичних збоїв;
- кількісна оцінка надійності, її забезпечення шляхом спостереження і перевірочних випробувань, а також обмеження шляхом врахування відмов із загальних причин і систематичних несправностей;
- методи аналізу для ідентифікації та усунення потенційних випадкових і систематичних відмов.

На національному рівні нормативне забезпечення безпеки та енергоефективності АЕС розробляється відповідно до «Енергетична стратегія України на період до 2035 року»[16], як було зазначено вище. Основою для [16], є діючі нормативно-правові акти України, міжнародні стандарти, рекомендації МАГАТЕ, міжнародні та європейські угоди у сфері атомної енергетики, тощо.

Внаслідок укладення Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом у 2015 році, почалася реалізація завдань з адаптації законодавства ЄС в галузі безпеки використання ядерної енергії та радіаційного захисту до українського законодавства. Протягом періоду з 2017 по 2022 роки, відповідно до планів імплементації, затверджених Урядом України, Держатомрегулювання виконало значну кількість заходів з імплементації ряду актів законодавства ЄС. Зокрема, ці заходи охоплюють Директиву Ради 2013/59/Euratom, яка встановлює основні норми безпеки для захисту від іонізуючої радіації; Директиву Ради 2006/117/Euratom щодо нагляду та контролю за перевезенням радіоактивних відходів та відпрацьованого ядерного палива; і Директиву Ради 2014/87/Euratom, яка визначає основи ядерної безпеки для ядерних установок у Співтоваристві.

Ключовим етапом на шляху України до відповідності стандартам ЄС у сфері регулювання ядерної безпеки стало отримання повноправного членства в Асоціації регуляторів ядерної енергії Західної Європи (WENRA) 26 березня 2015 року через дії Державної інспекції ядерного регулювання України. Участь в WENRA дозволяє Україні гармонізувати внутрішнє законодавство у сфері ядерної безпеки з референтними рівнями, встановленими WENRA, а також активно брати участь у розробці та перегляді цих стандартів. Важливо відзначити, що Україна на сьогоднішній день, за винятком Швейцарії та Сполученого Королівства Великої Британії та Північної Ірландії, які не є членами ЄС, є єдиною країною, яка досягла повноправного членства в цій асоціації.

Основоположні принципи, критерії та вимоги забезпечення безпеки АЕС викладені в загальних положеннях: НП 306.2.221-2019 «Вимоги безпеки під час поведінки з ядерним паливом» [30], «Вимог з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем,

важливих для безпеки атомних станцій» [31], «Положення про функціональну підсистему ядерної та радіаційної безпеки єдиної державної системи цивільного захисту» [32], НП 306.2.227-2020 «Загальні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій» [33], «Загальних положень безпеки зняття з експлуатації ядерних установок» [34], «Вимог до кіберзахисту інформаційних та керуючих систем атомних станцій для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки» [35] та інших НД. Повний перелік НД, що діють в ядерній енергетиці України, наведено у нормативному документі ПР-Д.0.06.555-23-III «Перелік діючих нормативних документів експлуатуючої організації».

Один із основних принципів щодо нормативно-правового регулювання в Україні визначає системно-ієрархічний підхід при створенні та оновленні нормативних документів для атомних електростанцій (АЕС). На практиці цей принцип втілюється через створення ієрархічної структури нормативних документів з питань ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ), що включає в себе документи кількох рівнів, який представлено на рис.1.

Структура включає три рівні стандартів, що діють в Україні: міжнародні, європейські та національні (рис.1), та основні організації, що розробляють стандарти на цих рівнях. Організації умовно поділено на ті, що розробляють галузеві стандарти (в галузі атомної енергетики), та ті що розробляють загальні та галузеві. Під «Загальними» стандартами (горизонтальними) розуміється нормативні документи, що застосовуються не тільки в галузі атомної енергетики, а можуть бути використані і в інших сферах діяльності. Національні стандарти, як галузеві, так і загальні розробляються на основі міжнародних та європейських стандартів та рекомендацій. Для систематизації було обрано нормативні документи, дія яких поширюється на АЕС і ядерні установки і спрямовані на забезпечення ядерної та радіаційної безпеки АЕС в цілому, стандарти, норми і правила технологічних процесів, уніфіковані методики контролю, включаючи галузеві стандарти, типові програми, згідно з якими виконується технічне обслуговування, випробування, оцінка технічного стану і прогнозування залишкового ресурсу обладнання; нормативні документи, що визначають вимоги для аналізу експлуатаційної надійності та енергоефективності обладнання.

Перевагою запропонованої структури нормативних документів при розгляді питань оцінки технічного стану та продовження ресурсу обладнання полягає, перш за все, в чіткості і однозначності обраних напрямків виконання даних робіт. Стандарти, які наведені в структурі, не дозволяють в повній мірі оцінити реальний технічний стан обладнання і його залишковий ресурс, але за допомогою поділу стандартів на групи стає можливим формування єдиних класифікаційних критеріїв, яким повинно відповідати нормативне забезпечення з оцінки технічного стану та продовження ресурсу трубопроводів.

В даний час діє «Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки енергоблоків АЕС України», яка розроблена для подальшої реалізації робіт з підвищення безпеки в рамках виконання довгострокової державної стратегії підвищення безпеки енергоблоків АЕС ДП НАЕК «Енергоатом».

Науково-технічний рівень наведених програм визначається ступенем відповідності сучасним науково-технічним досягненням. У програмах реалізовані основні принципи безпеки:

- Наявність спеціальних систем безпеки, побудованих на принципі створення паралельних каналів, які виконують однакову функцію;
- Забезпечення принципів: незалежність, резервування, обліку одиничної відмови при створенні систем безпеки;
- Високий ступінь контролю та автоматизації технологічних процесів;
- Забезпечення безпеки при зовнішніх впливах, включаючи природно і техногенні впливи;
- Забезпечення безпеки при широкому спектрі відмов, можливих помилок персоналу та додаткових впливів;
- Застосування консервативного підходу при виборі технічних рішень, що впливають на безпеку.

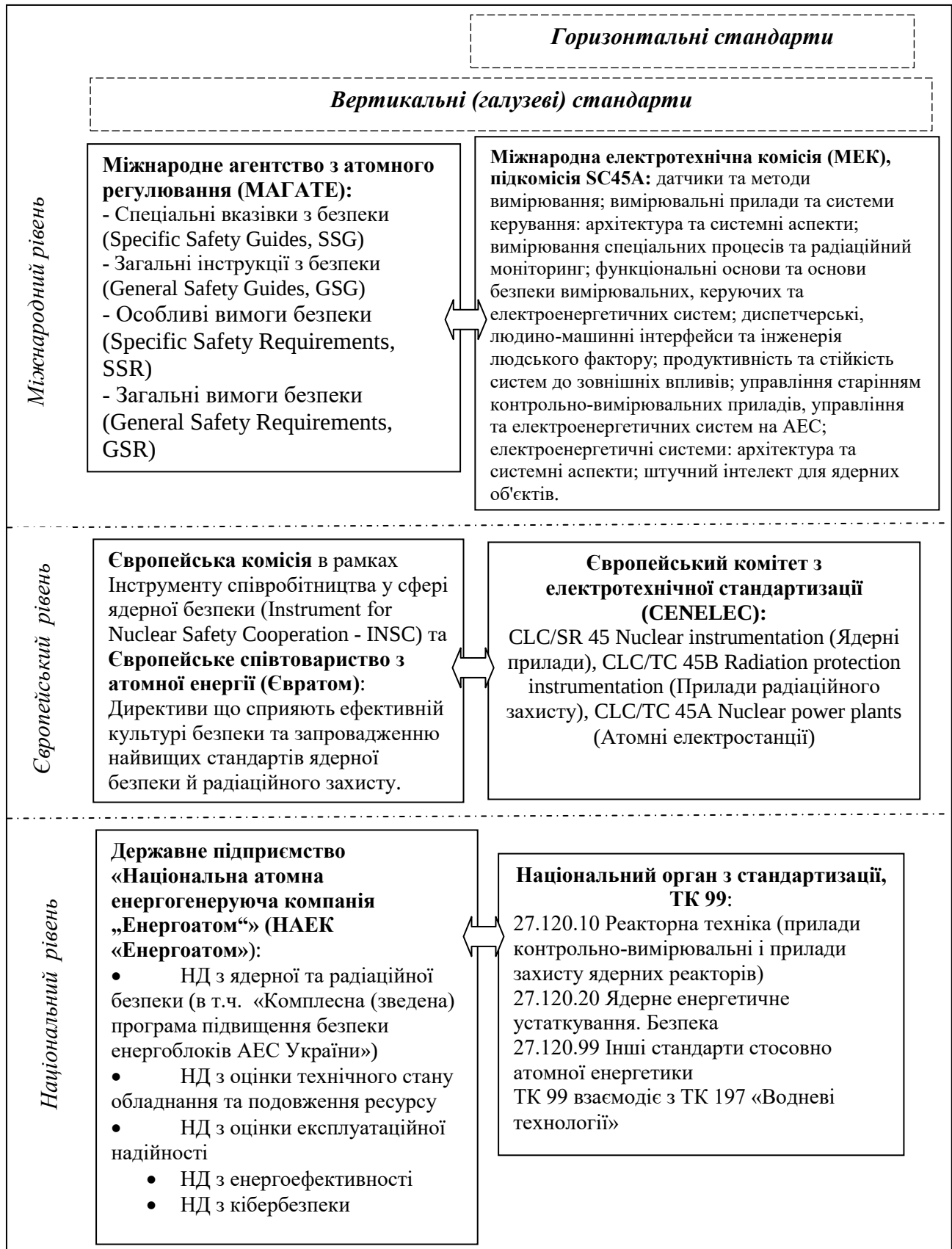


Рис. 1 - Структурно-ієрархічна система нормативного забезпечення безпеки та ефективності у сфері атомної енергетики України

У наведених вище стандартах стан обладнання має якісну оцінку, наприклад, «справний» або «несправне», «працездатне» або «непрацездатний», «в нормі» і т.д. Для концепції, заснованої на принципі «безпечної експлуатації за технічним станом», такий підхід є неприйнятним. Рекомендовані стандартами традиційні способи моніторингу і оцінки якості обладнання вирішують завдання поточної експлуатації, не враховуючи накопичення деградаційних змін, пов'язаних з процесами старіння обладнання за час експлуатації.

Висновки

В результаті проведеного аналізу нормативних документів стало можливим розробка структури нормативних документів для подальшого формування єдиних класифікаційних критеріїв нормативного забезпечення для вирішення проблеми оцінки технічного стану енергетичного обладнання АЕС з метою безпечної та ефективної експлуатації у позапроектний період.

Класифікаційні критерії нормативного забезпечення дозволять провести удосконалення нормативних документів для того, щоб виявити або розширити технічні параметри, що визначають процеси деградації та зниження енергоефективності обладнання з метою подальшого обґрунтування методу оцінки його поточного технічного стану, з огляду на вимоги безпечної експлуатації АЕС.

Результати проведеного аналізу нормативного та технічного забезпечення та особливостей технічної експлуатації енергообладнання дали можливість визначити подальші напрямки дослідження: виявити взаємозв'язок між оцінкою технічного стану обладнання та його енергоефективністю та запропонувати удосконалення нормативного забезпечення з урахуванням цих критеріїв.

Список використаних джерел:

1. Кіпоренко Г. С. Оцінка технічного стану трубопровідних систем АЕС на відповідність нормативним параметрам / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович, О. М. Хорошилов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 4. – С. 146–152.
2. Кіпоренко Г. С. Вдосконалення методики розрахунку опору крихкому руйнуванню трубопроводів Південно-Української АЕС / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 7. – С. 181–184.
3. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant / H. Hrinchenko, R. Trisch, V. Burdeina, S. Chelysheva // Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. <https://doi.org/10.46813/2019-120-104>.
4. Кіпоренко Г. С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Г. С. Кіпоренко ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2010. – 20 с.
5. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації / Г. С. Грінченко, С. М. Артюх, В. В. Грінченко, С. С. Негодов // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 62–69. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-62-69.
6. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників / Г. Грінченко, Т. Василець, О. Купріянов, О. Блізниченко, Т. Фурсова // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2023. – Вип. 31. DOI: 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
7. Методологічні підходи для оцінювання якості багатопараметричних об'єктів енергетики / Буданов П. Ф., Грінченко Г. С., Нечуйвітер О. П., Цихановська І. В. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – С. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04>
8. Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017 / R. Trishch, O. Maletska, H. Hrinchenko [et. al.] // Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (Sozopol, 6-8 September 2019). – Sozopol, 2019. – Pp. 715–720.
9. Аналізування вимог міжнародних стандартів щодо міжлабораторних та внутрішньолaborаторних порівнянь результатів випробувань випробувальних (калібрувальних) лабораторій / Тріщ Р. М., Артюх С. М.,

Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Черняк О. М. // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2021. – Вип. 27. – С. 110-116.

10. Імплементация вимог стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025: 2017 щодо невизначеності вимірювання при оцінюванні відповідності / Грінченко Г. С., Артюх С. М., Бурдейна В. М., Черняк О. М., Кіпоренко О. В. // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2021. – Вип. 27. – С. 96-103.

11. Імплементация вимог міжнародних стандартів щодо невизначеності вимірювань в метрологічну діяльність підприємств / Тріщ Р. М., Артюх С. М., Бурдейна В. М., Грінченко Г. С., Черняк О. М. // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2021. – Вип. 27. – С. 117-124.

12. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: Європейський Зелений Курс / Грінченко Г. С., Ковтун О. А., Миколайко В. В., Нестеренко Р. О., Антоненко Н. С. *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків, 2022. – Вип. 30. – С. 61-72. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72

13. 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. Green Energy and Technology / Koval, V., Olczak, P. (eds).* – Springer, Cham, 2023. – Pp. 1-17. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1

14. 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. – P. 6488. DOI <https://doi.org/10.3390/en16186488>

15. 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. – P. 771. DOI <https://doi.org/10.3390/su16020771>

16. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” : Розпорядж. Каб. М-в України від 08.08.2017 р. № 605. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#n8> (дата звернення 09.11.23).

17. Комплаєнс-політика ДП «НАЕК «Енергоатом» ПЛ-С.014.150-21 від 13.07.2021 р. – Режим доступу : <https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/compliance-policy/compliance-policy.pdf> (дата звернення 09.11.23).

18. Ageing Management for Research Reactors. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, 2023, No. SSG-10. (Rev. 1), STI/PUB/2050, 978-92-0-103023-8, 55 p.

19. Ageing Management for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, 2009, No. NS-G-2.12, STI/PUB/1373, 978-92-0-112408-1, 48 p.

20. Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, 2018, No. SSG-48, STI/PUB/1814, 978-92-0-104318-4, 65 p.

21. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, 2013, No. SSG-25, STI/PUB/1588, 978-92-0-137410-3, 106 p.

22. Advanced Control Systems to Improve Nuclear Power Plant Reliability and Efficiency. (1997) IAEA-TECDOC-952, 186 p.

23. Fundamental Safety Principles IAEA. Safety Standards Series No. SF-1, STI/PUB/1273 (21 pp.; 2006).

24. IEC 60231:1967 «General principles of nuclear reactor instrumentation» by IEC TC/SC 45A, 42 p.

25. IEC 60568:2006 «Nuclear power plants - Instrumentation important to safety - In-core instrumentation for neutron fluence rate (flux) measurements in power reactors», TC 45/SC 45A, 31 p.

26. Safety of nuclear power plants : design / International Atomic Energy Agency. Description: Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. Series: IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. SSR-2/1 (Rev. 1), 99 p.

27. Safety of research reactors : safety requirements. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2005.— (Safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. NS-R-4), 137 p.

28. Safety of nuclear fuel cycle facilities. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. - (IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. NS-R-5 (Rev. 1), STI/PUB/1641, 123 p.

29. Defence in depth in nuclear safety : INSAG-10 / a report by the International Nuclear Safety Advisory group. - Vienna : International Atomic Energy Agency, 1996. (INSAG series, ISSN 1025-2169), STI/PUB/1013, 48 p.

30. Про затвердження Вимог безпеки під час поводження з ядерним паливом : Наказ Держатомрегулювання від 21.06.2019 р. № 269, зареєстрований у Мін'юсті 30.07.2019 р. за № 833/33804. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0833-19#Text> (дата звернення 09.11.23).

31. Про внесення змін до Вимог з ядерної та радіаційної безпеки до інформаційних та керуючих систем, важливих для безпеки атомних станцій : Наказ Держатомрегулювання від 25.11.2019 р. № 508 зареєстрований у Мін'юсті 24.12.2019 р. за № 1280/34251. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1280-19#Text> (дата звернення 09.11.23).

32. Про затвердження Положення про функціональну підсистему ядерної та радіаційної безпеки єдиної державної системи цивільного захисту : Наказ Держатомрегулювання від 14.02.2020 № 57, зареєстрований у Мін'юсті 13.04.2020 р. за № 340/34623. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-20#Text> (дата звернення 09.11.23).

33. Про затвердження Загальних вимог безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій : Наказ Держатомрегулювання від 04.08.2020 № 319, зареєстрований у Мін'юсті 30.09.2020 р. за № 955/35238. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0955-20#Text> (дата звернення 09.11.23).

34. Про затвердження Загальних положень безпеки зняття з експлуатації ядерних установок : Наказ Держатомрегулювання від 28.10.2020 р. № 440, зареєстрований у Мін'юсті 30.12.2020 р. за № 1311/35594;12. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1311-20#Text> (дата звернення 09.11.23).

35. Про затвердження Вимог до кіберзахисту інформаційних та керуючих систем атомних станцій для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки : Наказ Держатомрегулювання від 22.03.2022 р. № 223, зареєстрований в Мін'юсті 07.04.2022 р. за №395/37731. - Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-22#Text> (дата звернення 09.11.23).

References:

1. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, 'Otsinka tekhnichnoho stanu truboprovodnykh system AES na vidpovidnist normatyvnykh parametrov' [Assessment of the technical condition of the pipeline systems of nuclear power plants for compliance with regulatory parameters], *Systemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.

2. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, 'Vdoskonalennia metodyky rozrakhunku oporu krykhhkomu ruinuuvanniu truboprovodiv Pivdenno-Ukrainskoi AES' [Improvement of the methodology for calculating the resistance to brittle fracture of pipelines at the South Ukrainian Nuclear Power Plant], *Systemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.

3. Hrinchenko, H, Trishch, R, Burdeina, V & Chelysheva, S 2019, 'Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant' [Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant], *Problems of Atomic Science and Technology, Section Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, no. 2 (120), pp. 104-110.

4. Kiporenko, HS 2010, 'Udoskonalennia normatyvnoho zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky truboprovodnykh system atomnykh elektrostantsii' [Improvement of the regulatory framework for operational safety assurance of pipeline systems at nuclear power plants], *Kand.tehn.n. abstract, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia*, Kharkiv.

5. Hrinchenko, HS, Artiukh, SM, Hrinchenko, VV & Nehodov, SS 2022, 'Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahnostyky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii' [Standardization of methods for technical diagnostics of pipeline systems to ensure safe operation], *Mashynobuduvannia*, iss 29, Pp. 62-69. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-62-69.

6. Hrinchenko, H., Vasylets, T., Kupriianov, O., Bliznychenko, O., & Fursova, T. 2023, 'Pidvyshchennia yakosti ASU teplovykh elektrostantsii shliakhom utochnennia kryteriia optymalnosti tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv' [Improving the quality of the automation control systems of thermal power plants by refining the criterion of optimality for technical and economic indicators], *Mashynobuduvannia*, iss 31, DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79.

7. Budanov, PF, Hrinchenko, HS, Nechuiviter, OP, Tsykhanovska, IV 2023, 'Metodolohichni pidkhody dlia otsiniuvannia yakosti bahatoparametrychnykh ob'ektiv enerhetyky' [Methodological approaches for evaluating the quality of multi-parameter objects in the energy sector], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh, no 1, Pp. 27-35, DOI <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04>

8. Trishch, R, Maletska, O, Hrinchenko, H [et. al.] 2019, 'Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017' *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (Sozopol, 6-8 September 2019)*, Sozopol, Pp. 715-720.

9. Trishch, RM, Artiukh, SM, Burdeina, VM, Hrinchenko, HS & Cherniak, OM 2021, 'Analizuvannia vymoh mizhnarodnykh standartiv shchodo mizhlaboratorynykh ta vnutrishnolaboratorynykh porivnian rezultativ vyprobuvan vyprobuvalnykh (kalibruvalnykh) laboratorii' [Analysis of requirements from international standards regarding inter-laboratory and intra-laboratory comparisons of testing (calibration) laboratory test results], *Mashynobuduvannia*, iss. 27, Pp. 110-116.

10. Hrinchenko, HS, Artiukh, SM, Burdeina, VM, Cherniak, OM & Kiporenko, OV 2021, 'Implementatsiia vymoh standartu DSTU ISO/IEC 17025: 2017 shchodo nevyznachenosti vymiriuvannia pry otsiniuvanni vidpovidnosti' [Implementation of the requirements of the DSTU ISO/IEC 17025:2017 standard regarding measurement uncertainty in conformity assessment], *Mashynobuduvannia*, iss 27, Pp. 96-103.

11. Trishch, RM, Artiukh, SM, Burdeina, VM, Hrinchenko, HS & Cherniak, OM 2021, 'Implementatsiia vymoh mizhnarodnykh standartiv shchodo nevyznachenosti vymiriuvan v metrolohichnu diialnist pidpriemstv' [Implementation of international standards requirements on measurement uncertainty into the metrological activities of enterprises], *Mashynobuduvannia*, iss 27, Pp. 117-124.

12. Hrinchenko, HS, Kovtun, OA, Mykolaiko, VV, Nesterenko, RO, Antonenko, NS 2022, 'Zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky AES u ponadproektnyi termin v konteksti perekhodu do tsyrkuliarnoi ekonomiky: Yevropeiskyi Zelenyi Kurs' [*Ensuring operational safety of nuclear power plants beyond project lifespan in the context of transitioning to a circular economy: The European Green Deal*], *Mashynobuduvannia*, iss 30, Pp. 61-72. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72
13. Hrinchenko, H, Kupriyanov, O, Khomenko, V, Khomenko, S & Kniazieva, V 2023, An Approach to Ensure Operational Safety for Renewable Energy Equipment, In: Koval, V., Olczak, P. (eds) *Circular Economy for Renewable Energy. Green Energy and Technology*, Springer, Cham, Pp. 1-17, DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
14. 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*, iss 16, 6488, DOI <https://doi.org/10.3390/en16186488>
15. 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, 771, DOI <https://doi.org/10.3390/su16020771>
16. Kabinet Ministriv Ukrainy 2017, Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist": Rozporiadzhennia vid 08.08.2017 №605 [*On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2035 'Security, Energy Efficiency, Competitiveness': Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 8, 2017, No. 605*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#n8>>
17. NAEK «Enerhoatom» 2021, Komplaiens-polityka DP «NAEK «Enerhoatom» PL-S.014.150-21 vid 13.07.2021 r. [*Compliance Policy of State Enterprise 'Nuclear Power Generation Company 'Energoatom' PL-S.014.150-21 dated July 13, 2021*], 9 November 2023 <<https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/compliance-policy/compliance-policy.pdf>>
18. IAEA 2023, Ageing Management for Research Reactors. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-10. (Rev. 1), STI/PUB/2050, 978-92-0-103023-8, 55 p.
19. IAEA 2009, Ageing Management for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. NS-G-2.12, STI/PUB/1373 | 978-92-0-112408-1, 48 p.
20. IAEA 2018, Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-48, STI/PUB/1814, 978-92-0-104318-4, 65 p.
21. IAEA 2013, Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants. Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series, No. SSG-25, STI/PUB/1588 | 978-92-0-137410-3, 106 p.
22. IAEA 1997, Advanced Control Systems to Improve Nuclear Power Plant Reliability and Efficiency. IAEA-TECDOC-952, 186 p.
23. IAEA 2006, Fundamental Safety Principles IAEA. Safety Standards Series No. SF-1, STI/PUB/1273, 21 p.
24. IEC 60231:1967 «General principles of nuclear reactor instrumentation» by IEC TC/SC 45A, 42 p.
25. IEC 60568:2006 «Nuclear power plants - Instrumentation important to safety - In-core instrumentation for neutron fluence rate (flux) measurements in power reactors», TC 45/SC 45A, 31 p.
26. Safety of nuclear power plants : design / International Atomic Energy Agency. Description: Vienna : International Atomic Energy Agency, 2016. Series: IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. SSR-2/1 (Rev. 1), 99 pp.
27. Safety of research reactors : safety requirements. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2005.— (Safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. NS-R-4), 137 p.
28. Safety of nuclear fuel cycle facilities. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2014. - (IAEA safety standards series, ISSN 1020-525X ;no. NS-R-5 (Rev. 1), STI/PUB/1641, 123 p.
29. Defence in depth in nuclear safety : INSAG-10 / a report by the International Nuclear Safety Advisory group. - Vienna : International Atomic Energy Agency, 1996. (INSAG series, ISSN 1025-2169), STI/PUB/1013, 48 p.
30. Derzhatomrehuliuvannia 2019, Pro zatverdzhennia Vymoh bezpeky pid chas povodzhennia z yadernym palyvom: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 21.06.2019 № 269, zareiestrovanyi u Miniusti 30.07.2019 za № 833/33804 [*On approval of Safety Requirements for Nuclear Fuel Handling: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated June 21, 2019, No. 269, registered with the Ministry of Justice on July 30, 2019, under No. 833/33804*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0833-19#Text>>
31. Derzhatomrehuliuvannia 2019, Pro vnesennia zmin do Vymoh z yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky do informatsiinykh ta keruiuchykh system, vazhlyvykh dlia bezpeky atomnykh stantsii: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 25.11.2019 № 508 zareiestrovanyi u Miniusti 24.12.2019 za № 1280/34251 [*Regarding Amendments to the Requirements for Nuclear and Radiation Safety of Information and Control Systems Vital for the Safety of Nuclear Power Plants: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated November 25, 2019, No. 508, registered with the Ministry of Justice on December 24, 2019, under No. 1280/34251*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1280-19#Text>>

32. Derzhatomrehuliuvannia 2020, Pro zatverdzhennia Polozhennia pro funktsionalnu pidsystemu yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky yedynoi derzhavnoi systemy tsyvilnoho zakhystu: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 14.02.2020 № 57, zareiestrovanyi u Miniusti 13.04.2020 za № 340/34623 [*Regarding the Approval of the Regulations on the Functional Subsystem of Nuclear and Radiation Safety of the Unified State System of Civil Protection: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated February 14, 2020, No. 57, registered with the Ministry of Justice on April 13, 2020, under No. 340/34623*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-20#Text>>

33. Derzhatomrehuliuvannia 2020, Pro zatverdzhennia Zahalnykh vymoh bezpeky do ulashtuvannia ta ekspluatatsii obladnannia y truboprovodiv atomnykh stantsii: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 04.08.2020 № 319, zareiestrovanyi u Miniusti 30.09.2020 za № 955/35238 [*Regarding the Approval of General Safety Requirements for the Design and Operation of Equipment and Pipelines at Nuclear Power Plants: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated August 4, 2020, No. 319, registered with the Ministry of Justice on September 30, 2020, under No. 955/35238*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0955-20#Text>>

34. Derzhatomrehuliuvannia 2020, Pro zatverdzhennia Zahalnykh polozhen bezpeky zniattia z ekspluatatsii yadernykh ustanovok: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 28.10.2020 № 440, zareiestrovanyi u Miniusti 30.12.2020 za № 1311/35594;12 [*Regarding the Approval of General Safety Provisions for Decommissioning of Nuclear Installations: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated October 28, 2020, No. 440, registered with the Ministry of Justice on December 30, 2020, under No. 1311/35594;12*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1311-20#Text>>

35. Derzhatomrehuliuvannia 2022, Pro zatverdzhennia Vymoh do kiberzakhystu informatsiinykh ta keruiuchykh system atomnykh stantsii dlia zabezpechennia yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky: Nakaz Derzhatomrehuliuvannia vid 22.03.2022 № 223, zareiestrovanyi v Miniusti 07.04.2022 za №395/37731 [*Regarding the Approval of Requirements for Cybersecurity of Information and Control Systems of Nuclear Power Plants to Ensure Nuclear and Radiation Safety: Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate dated March 22, 2022, No. 223, registered with the Ministry of Justice on April 7, 2022, under No. 395/37731*], viewed 9 November 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-22#Text>>

Стаття надійшла до редакції 30 січня 2024 року.

ДО УВАГИ АВТОРІВ

У зв'язку зі зміною редакційної політики та популяризацією за кордоном збірника наукових праць УПА «Машинобудування» (далі – Збірник) через світові бібліографічні, наукометричні бази, міжнародні каталоги повідомляємо наступне.

Науковий фаховий Збірник приймає до публікації наукові праці з напрямків галузеве машинобудування, матеріалознавство, прикладна механіка та метрологія та інформаційно – вимірювальна техніка.

Збірник зареєстровано у Міжнародному центрі періодичних видань, йому присвоєно Міжнародний стандартний номер серійного видання ISSN (International Standard Serials Number) 2079-1747 (print). Збірник індексується в міжнародних каталогах та наукометричних базах даних: Index Copernicus, Google Scholar, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OpenAIRE (Open Access Infrastructure for Research in Europe), WorldCat, iDiscover, [Dimensions](#), ISSN National Centre (ROAD), SciLit, Fatcat, LENS, PHSG University of Education St.Gallen, University of Washington Libraries, Research4Life, а також українських Open Ukrainian Citation Index і Наукова періодика України.

Публікаційна етика та правила оформлення наукових публікацій

Редакційна колегія Збірника орієнтується в роботі на норми та принципи міжнародної організації Committee on Publication Ethics (COPE), її політика базована на рекомендаціях Budapest Open Access Initiative (BOAI).

Опубліковані в Збірнику наукових праць УПА статті мають бути результатом наукових досліджень авторів, внеском у розвиток науки і забезпечувати спадкоємність наукових поглядів. З урахуванням цього редакція встановлює стандарти етичної поведінки для всіх сторін, що беруть участь в процесі публікації.

Обов'язки авторів

1. Стандарт авторства

Авторство має бути обмежене лише тими, хто вніс значний внесок в одержання результатів дослідження (розробка концепції, наукової ідеї та інш.). Автор, який представляє редакції рукопис, повинен гарантувати, що ним вказано всіх співавторів, що вони бачили і схвалили остаточний варіант рукопису і згодні з її поданням до редакції для публікації.

Статті, що подаються аспірантами, здобувачами, повинні мати рекомендацію наукового керівника, якщо він не є співавтором статті.

2. Стандарт однократності (неприпустимість паралельних публікацій).

Автор не повинен подавати до редакції рукопис раніше опублікованої статті. Він не повинен також подавати рукопис однієї і тієї ж за змістом статті в редакції декількох журналів одночасно.

Подача рукопису одночасно в кілька журналів є неетичною і неприйнятною.

3. Стандарт доступу до вихідних даних, дослідження та їх зберігання.

Автор зобов'язаний подати вихідні матеріали (дані) дослідження на вимогу редакції і повинен бути готовий надати публічний доступ до них. Автор повинен зберігати ці дані протягом певного часу після публікації.

4. Стандарт оригінальності і неприпустимість плагіату

Автор повинен представити в редакцію абсолютно оригінальну статтю. Якщо він використовував роботи або включає в свою статтю фрагменти з робіт (цитати) інших осіб, то

таке використання має бути належним чином оформлене (лапки, виноска на джерело цитування, вказівка оригінального джерела в бібліографічному списку до статті).

Плагіат в будь-якій формі є неетичною і неприйнятною поведінкою автора.

5. Стандарт підтвердження джерел

Автор повинен в бібліографічному списку правильно вказати наукові та інші джерела, які він використовував у ході дослідження та які мали істотний вплив на результати дослідження.

Джерела, на які є виноска в тексті рукопису статті, повинні бути вказані в обов'язковому порядку. Інформація, отримана з неофіційних (приватних) джерел (розмова, листування, обговорення з третіми особами та ін.), не повинна використовуватися.

6. Стандарт виправлення помилок в опублікованих роботах

Якщо автор виявить суттєву помилку або неточність у вже опублікованій статті, то він зобов'язаний негайно повідомити про це редакцію і сприяти їй у виправленні помилок.

Якщо редакція дізнається про помилку від третіх осіб, то автор зобов'язаний негайно усунути помилку або представити докази її відсутності.

Загальні правила оформлення наукових публікацій

1. До друку приймаються наукові статті, що мають наукову і практичну цінність. Редакція приймає статті, повністю підготовлені до друку в збірнику наукових праць. Статті, оформлення яких не відповідає вказаним вимогам, не приймаються до друку.

2. Рішення щодо публікації (позитивне чи негативне) повідомляється автору. Стаття може бути повернена для доопрацювання. Рукописи авторам не повертаються.

3. Статті, відіслані авторам на доопрацювання, повинні бути повернені до редакції не пізніше, ніж через 10 днів після їх одержання.

4. До розгляду приймаються наукові статті обсягом не менше 18-20 тис. знаків (включаючи таблиці, графіки, рисунки), формат паперу – А4, орієнтація – книжкова, всі поля – 2 см, міжрядковий інтервал – 1,5, кегль шрифту – 14, гарнітура – Times New Roman, абзац – 1,25 см.

5. Формули, рисунки, таблиці вставляються по тексту одразу після посилання на них. Ілюстрації повинні бути чіткими, формули – написані загальноприйнятою символікою. Розмір шрифту в ілюстраційному матеріалі не менше 10 пт.

6. Статті подаються в електронному варіанті у вигляді файлів (текст форматами DOCX, RTF, графіки, рисунки – JPEG, PNG, TIFF). Якщо текст статті разом з ілюстраціями виконано у вигляді одного файлу, то необхідно додатково подати файли із ілюстраціями (одна ілюстрація – один файл).

7. На електронну адресу редакції подається комплект файлів, до якого має бути додано опис, де зазначаються:

- імена файлів,
- назва статті,
- спеціальність,
- прізвище, ім'я та по батькові авторів.

8. До редакції приймаються документи Microsoft Word версій 2007 року і пізніше **в форматі *.docx**. Документи Word 2003 та більш ранні **в форматі *.doc не приймаються**.

9. Редакція залишає за собою право вносити поправки до статей, не змінюючи основного змісту. Відповідальність за цитування та достовірність інформації несуть автори статей.

10. Мова публікацій: українська, англійська.

11. Слід чітко розмежовувати тире (–) та дефіс (-). Необхідно використовувати однотипні лапки («...» – для українського та російського тексту статті та “...” – для

англійського). Не допускається ставити абзацний відступ пробілами та клавішею Tab. Рядки тексту в межах абзацу не повинні розділятися клавішею Enter.

12. Не допускається використання переносів. Між ініціалами, ініціалами та прізвищем ставиться нерозривний пробіл. Нумерація сторінок не проставляється.

13. Збірник з опублікованою статтею надсилається авторові поштою або видається у редакції.

Структура наукової статті

(відповідно вимог ДСТУ 7152:2010

«Видання. Оформлення публікацій у журналах і збірниках»)

Матеріали, подані до збірника, мають відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. №7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України», Постанови Кабінету Міністрів України від 27 січня 2010 р. № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» та повинні мати такі необхідні відомості:

1. **Індекс УДК** (вирівнювання по лівому краю). Визначити код УДК ви можете на сайті бібліотеки: <http://library.uipa.edu.ua/>

2. **Назва статті** (вирівнювання по центру, шрифт – напівжирний, великі літери).

3. **Прізвище та ініціали авторів**, співавторів (шрифт напівжирний)

4. **Анотація** (авторське резюме) без слова «Анотація» подається двома мовами – українською та англійською. Анотація містить прізвища та ініціали авторів (напівжирний курсив), назву статті у лапках, текст анотації. Обсяг анотації повинен бути не менше 1800 знаків.

5. **Ключові слова** (напівжирний курсив) – 5-6 слів через крапку з комою двома мовами – українською та англійською.

6. **Текст наукової статті.**

7. **Список використаних джерел** українською, англійською або російською мовами відповідно до ДСТУ ГОСТ 7.1-2006 (дивись сайт бібліотеки <http://library.uipa.edu.ua/>), англійською мовою відповідно до міжнародних стандартів (<https://web.library.uq.edu.au/files/424/filename.pdf>). В оригінальних роботах цитують не менш 15 праць, а в оглядах – до 50. Список повинний містити публікації за останні 10 років, більш ранні допускаються лише в особливих випадках.

8. **References** – список використаних джерел латинськими літерами відповідно до стандарту Harvard, <http://library.uipa.edu.ua/poslygy/naukovtsiam-fakhivtsiam/naukovtsiam/spysok-literatury-references-standart-harvard.html> (Постанова Кабінету Міністрів України від 27 січня 2010 р. №55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею»).

На сайті <https://slovnyk.ua/translit.php> можна безкоштовно скористатися сервісом транслітерації україномовного тексту в латиницю.

9. Стаття повинна супроводжуватися **авторською довідкою** (для кожного автора) двома мовами – українською та англійською.

10. Авторська довідка містить наступні дані:

- назва статті;

- прізвище, повне ім'я та по батькові;

- вчений ступінь, вчене звання;

- місце роботи (англійською мовою – повна офіційно-прийнята назва установи);

- посада;

- ідентифікатор ORCID (дивись <http://library.uipa.edu.ua/poslygy/naukovtsiam-fakhivtsiam/naukovtsiam/avtorski-profil-vchenykh-v-google-scholar-ta-orcid.html>);

- адреса для листування, телефон, e-mail;
- адреса для відправки авторського екземпляру.

У кінці довідки треба зазначити «Поданий матеріал раніше не публікувався і до інших видавництв не надсилався». «Не заперечую проти виставлення повного тексту статті на сайт Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, в реферативну базу даних «Україніка наукова» та повнотекстову базу даних «Наукова періодика України», сайт Наукової бібліотеки УПА.

Рекомендації до написання анотацій (авторських резюме) до наукових статей

До публікації приймаються рукописи з максимально конкретизованими анотаціями. Композиційно анотація може бути збудована за принципами IMRAD (Introduction, Methods (Methodology), Results and Discussion). Загальновизнаною світовою практикою є використання анотацій (англійською мовою – resume чи abstract) не лише як структурного компонента власне наукової статті, але й як окремої наукової форми, що має на меті ознайомити у найзагальніших рисах із суттю та змістом дослідження.

Актуальність – актуальність дослідження. Мета – мета і завдання дослідження. Не слід повторювати назву статті. Якщо з назви статті мета та завдання роботи є зрозумілими, то це речення слід пропустити. Наприклад, можна вказати – Розглянуті напрямки... Не використовувати такі слова як «В цій статті, в статті». Компетентні дослідники чудово розуміють, що мова йде саме про Вашу статтю.

Методи (методологія дослідження) – відомості про те, коли, де, як проводилося дослідження; яка інформація, методи використовувалися; хто був включений в групу піддослідних. **Метод або методологію** проведення роботи доцільно описувати в тому випадку, якщо вони відрізняються новизною або їх розробка становить самостійну частину роботи. У рефератах документів, що описують експериментальні роботи, вказують джерела даних і характер їхньої обробки.

Результати – основні висновки (конкретика), результати дослідження. Наприклад – Встановлено..., З'ясовано..., Показано... та ін. **Результати** роботи описують гранично точно й інформативно. Наводять основні теоретичні та експериментальні результати, фактичні дані, виявлені зв'язки і закономірності. При цьому перевага надається новим результатам і даним довгострокового значення, важливим відкриттям, висновкам, які спростовують наявні теорії, а також даними, що, на думку автора, мають практичне значення.

Висновки можуть містити рекомендації, оцінки, пропозиції, гіпотези, описані у статті. Не рекомендується вказувати, що Ваш підхід або методика є кращими, ніж в інших авторів. Це є зрозумілим із самого статусу статті як наукової.

Перспективи – інформація про те, як отриманий результат співвідноситься з висновками інших учених, які перспективи дослідження, напрями подальшої роботи, складності.

При підготовці анотації слід виходити з того, що Ви пишите для компетентних дослідників і широкого кола потенційних англomовних користувачів. Тому можете вводити до анотації спеціальні терміни. Слід чітко викладати свою позицію. Від стилю її викладення залежить кількість звертань і, що є особливо важливим і актуальним сьогодні, кількість цитувань Вашої публікації. Анотація не повинна містити загальних слів.

Авторське резюме повинно викладати суттєві факти роботи, і не повинно перебільшувати або містити матеріал, який відсутній в основній частині публікації.

Відомості, що містяться в заголовку статті, не повинні повторюватися в тексті авторського резюме. Скорочення та умовні позначення не допускаються.

В авторському резюме не робляться посилання на номер публікації в списку літератури до статті.

Слід уникати зайвих вступних фраз (наприклад, «автор статті розглядає»). Історичні довідки, якщо вони не становлять основний зміст документа, опис раніше опублікованих робіт та загальновідомі положення в рефераті не наводять.

У тексті анотації слід вживати синтаксичні конструкції, властиві мові наукових і технічних документів, уникати складних граматичних конструкцій (не застосовуваних у науковій англійській мові).

Обсяг тексту повинний бути 1800 знаків.

Приклад авторського резюме українською мовою:

Значна частина планів по впровадженню змін, що містять в своїй основі нововведення, або не доходить до практичної реалізації, або в дійсності приносить набагато менше користі, ніж планувалося..... У статті пропонується механізм ..., заснований на аналізі ... Дослідження спирається на звід правил і процедур, що містять серію методів, використання яких дозволяє ... До таких методів відносяться:Результатом розробленої автором методики ... є пропозиція, яка в своїй концептуальній основі орієнтується на ...вишукування шляхів та прискорить реалізацію....., що в кінцевому результаті призведе до....

Рекомендації до написання тексту наукової статті

Відповідно до Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003 р. №7-05/1 «Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України», текст статті має бути із зазначенням наступних елементів:

- **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями;
- **аналіз останніх досліджень** і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття;
- **формулювання цілей статті** (постановка завдання);
- виклад **основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;
- **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку.

Особливості стилю наукової статті

Часто автори, які декларують звертання до наукової проблематики, використовують при цьому публіцистичний стиль викладу. Змішання стилів не є виправданим, оскільки створення якісного інтелектуального продукту не може асоціюватися із публіцистичністю у будь-якій її формі. Публіцистика і наука – це дві повноцінні, важливі для суспільного розвитку, але зовсім відмінні сфери інтелектуального самовираження. Отже, починаючи зі стадії осмислення прийомів збору інформації та закінчуючи формами викладу тих концепцій та ідей, до яких дійшов автор у результаті дослідження, слід чітко та однозначно орієнтуватися на загальновизнані наукові стандарти рівня аргументованості та стилю викладу матеріалу.

При цьому треба пам'ятати, щоб у статті не було бездоказових тез та концепцій; усі ідеї знаходилися у закономірному та обґрунтованому взаємозв'язку; автор прагнув до максимальної об'єктивності та пошуку наукової істини, вільної від тиску ідеології та емоцій.

Рекомендації до складання списку використаних джерел

Після статті подається 2 списки:

Список використаних джерел (звичайний список літератури) та **References** (список для міжнародних БД, де дані українською/російською мовою описуються за допомогою транслітерації (<https://slovnyk.ua/translit.php>), а джерела англійською дублюються зі списку

«Список використаних джерел»). Необхідно в опис документу в Списку та References вносити всіх авторів, не скорочуючи перелік до трьох, як це рекомендовано чинним у нас державним стандартом.

Правила оформлення списку літератури *References*, транслітерованого у романському алфавіті (латиниця)

Правильний опис використовуваних джерел у списках літератури є запорукою того, що цитована публікація буде врахована під час **оцінювання наукової діяльності її авторів**, отже, (по ланцюжку) — діяльності організації, регіону, країни.

За цитуванням журналу визначається його науковий рівень, авторитетність, ефективність діяльності його редакційної колегії і т. д. З цього виходить, що найбільш значущими складовими в бібліографічних посиланнях є **прізвища авторів і назви журналів**. Причому для того, щоб всі автори публікації були враховані в системі *Scopus*, **необхідно в опис статті вносити прізвища всіх авторів**, не скорочуючи їх до трьох, чотирьох та інше.

Для оформлення списку літератури *References* необхідно користуватись стандартом Harvard (<http://library.uipa.edu.ua/poslygy/naukovtsiam-fakhivtsiam/naukovtsiam/spysok-literatury-references-standart-harvard.html>).

Приклад опису статті з журналу:

Fritzowski, P & Kaminski, H 2009, 'Dynamics of a rope modeled as a discrete system with extensible members', *Computational Mechanics*, no. 44(4), pp. 473-480. doi:10.1007/s00466-009-0387-2.

Приклад опису книги:

Loveikin, V, Chovniuk, Yu, Dikteruk, M & Pastushenko, S 2004, *Modeliuvannia dynamiky mekhanizmiv vantazhopidiomnykh mashyn*, RVV MDAU, Mykolaiv.

ДЛЯ КОТАТОК

Збірник наукових праць «Машинобудування» входить до Категорії Б наукових фахових видань, включених до Переліку наукових фахових видань України (технічні науки), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук і доктора філософії (кандидата наук), накази МОН України №409 від 17.03.2020 та №320 від 07.04.2022.

Збірник наукових праць «Машинобудування» зареєстровано у Державному комітеті інформаційної політики України у 2006 році (Свідectvo про Державну реєстрацію засобу масової інформації серія KB № 12132-1016P). Друкований варіант видання зареєстровано у ISSN Register під номером ISSN 2079-1747.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

УДК 621 – 622

Машинобудування. Збірник наукових праць. Випуск 32. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2023. – 100 с.

У збірнику подано результати наукових досліджень в галузі машинобудування, метрології та інформаційно-вимірювальної техніки. Розглянуто важливі проблеми міцності, стійкості, роботоздатності, динаміки вантажопідйомних, транспортуючих машин та верстатів, питання технології машинобудування, а також метрологічні питання.

Для викладачів, науковців, аспірантів, фахівців в галузі машинобудування.

SCIENTIFIC EDITION

UDC 621 – 622

Engineering. Collection of Scientific Papers. Issue 32. – Kharkiv, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy (UEPA), 2023. – 100 p.

The collection presents the results of scientific research in the field of mechanical engineering, metrology, information and measurement technology. Important questions dealing with strength, stability, operability, dynamics of lifting, transporting machines and equipment, issues of mechanical engineering technology, as well as metrological issues are considered.

For instructors, research workers, post graduates, experts in the field of machine-building.



Підписано до друку 29.02.2024, Формат 60×84 ¹/₈. Умов. друк. арк. – 6,51.
Гарнітура *Times New Roman*. Друк цифровий. Наклад 50 прим. Ціна договірна.

Віддруковано в ФО-П Єфименко С.А.