



31

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 10.32820/2079-1747-2023-31

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

Соболь Л.А.

Відповідальний секретар

Соболь Л.А.

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, № 31

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 10.32820/2079-1747-2023-31

Мови видання:

українська, англійська

Друкується за рішенням Вченої ради УІПА,
протокол № 13 від 22.06.2023 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

ЗМІСТ

<u>Прикладна механіка</u>	4
Пташний О.Д., Першина Ю.І. Моделювання управління технологічним процесом	4
<u>Матеріалознавство</u>	12
Стрельчук Р.М. Аналіз сил різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів	12
Бринюк М.С., Кондратюк О.Л., Марков В.О., Скоркін А.О. Діагностика і прогнозування зносу різального інструмента при обробці на верстатах з ЧПК	21
<u>Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка</u>	33
Артюх С.М., Князева В.М., Антоненко Н.С., Грінченко Г.С. Алгоритм регулювання параметрів технологічного процесу в енергетичних установках.....	33
Канюк Г.І., Фурсова Т.М., Мезеря А.Ю., Долматов О.А., Заїка С.О., Галинський П.Р. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів	42
Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Чеботарьов А.М., Василець Т.Ю., Фурсова Т.М., Канюк М.Г. Аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання гідравлічних параметрів електростанцій для задач енергозберігаючого керування	50
Мезеря А.Ю., Придворов С.С. Аналіз якісних показників використання різних типів генераторів на міні ГЕС.....	61
Грінченко Г.С., Василець Т.Ю., Купріянов О.В. Близниченко О.М., Фурсова Т.М. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників	71
Крамаренко Ю.О., Близниченко Г.С. Оцінка впливу ефективності перетворювання теплоти регенеративній системі турбоустановок електростанцій на показники якості їх роботи.....	80
Мезеря А.Ю., Дрозд В.А. Оцінка впливу неупорядкованості інформації на показники якості систем автоматизованого керування.....	87
 До уваги авторів	 94

МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ

© Пташний О.Д.¹, Першина Ю.І.²

*Харківський Національний автомобільно-дорожній університет¹,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»²*

Інформація про авторів:

Пташний Олег Дмитрович (Ptashnyi Oleg Dmitrovich): кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Харківський Національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків; тел.: (050) 956-10-77; e-mail: olegptashnyi@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0001-6123-7253>.

Першина Юлія Ігорівна (Persyna Iuliia Igorevna): доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (050) 222-69-79; e-mail: yuliapershina78@gmail.com. <http://orcid.org/0000-0002-4719-8195>.

Розглядаються підходи до моделювання багатоопераційного технологічного процесу з урахуванням взаємного впливу параметрів виробів та технологічних операцій. Вектор стану виробу при проходженні технологічних операцій визначається набором актуальних параметрів, кількість та якісний зміст яких може змінюватись від операції до операції. «Стабілізується» вектор стану введенням «фіктивних» параметрів. Вводиться поняття вектору та матриці актуальності технологічної операції та поняття проектування вектору стану на них. Вектор та матриця актуальності технологічної операції зіставляють їй підпростір у просторі станів. Забезпечити ін'єктивність відображення множини технологічних операцій на множину векторів актуальності можна введенням додаткових фіктивних параметрів. Тоді множину векторів актуальності можна розглядати як підмножину області визначення деякої булевої функції, яка буде відповідати даному технологічному процесу. Технологічний процес розглядається як переміщення вектору стану з початкової у кінцеву область простору станів по траєкторії, що належить області переходу. Розглядаються інтервали значень вхідних та вихідних параметрів. Технологічна операція характеризується комплексом керуючих параметрів, які визначають режими обробки. Керуючі можливості операції характеризуються інтервалами варіювання керуючих параметрів. Вважається відомим зв'язок між векторами стану на вході та виході операцій, наприклад, у формі рівнянь регресії. Розрізняються власний та зовнішній негативні впливи технологічної операції на вихідні параметри виробу. Власний вплив операції полягає у критичній зміні вектора стану, обумовленої зміною керуючого впливу за умови номінальних вхідних параметрів. Зовнішній вплив технологічної операції полягає у тому, що за умови знаходження керуючого вектора у номінальній області вихідні параметри виходять за межі номінальних значень з причини такого ж порушення щодо вхідних параметрів. Вводиться матриця зовнішнього впливу операції. Вихід вектору стану на якомусь етапі з номінальної області переходу компенсується змінами параметрів керуючого вектору, що моделюється мінімізацією елементів матриці зовнішнього впливу з метою наближення її останнього рядку до нульового.

Ключові слова: технологічний процес, технологічна операція, простір станів, вектор стану, вектор актуальності, параметри виробу.

Ptashnyi Oleg Dmitrovich, Persyna Iuliia Igorevna. Abstract. Approaches to multi-operational technological process modeling are considered, taking into account the mutual influence of parameters of products and technological operations. State vector of the products during the passage of technological operations is determined by the set of relevant parameters, the quantitative and

qualitative meaning of which may vary from operation to operation. Vector of the state is being "stabilized" by introducing "fictitious" parameters. The concepts of a vector and matrices of the relevance of the technological operation are introduced as well as the concept of projection of state vectors on them. Vector and matrix of technological relevance of the operation assigns to it a subspace in the state space. Ensuring injectivity of mapping of a set of technological operations to the set of actuality vectors can be introduced by introducing additional dummy parameters. Then the set of relevance vectors can be considered as a subset of the scope of some Boolean function that will match the given technological process. The technological process is considered as the movement of the state vector from the initial to the final region of the state space along a trajectory that lies in the region of the transition. A technological operation is characterized by a set of control parameters that determine the processing modes. The control capabilities of the operation are characterized by the intervals of variation of the control parameters. The connection between the state vectors at the input and output of operations is assumed to be known, for example, in the form of regression equations. The own and external negative influences of the technological operation on the output parameters of the product are distinguished. The operation's own influence is a critical change in the state vector, due to a change in the control action, under the condition of nominal input parameters. The external influence of the technological operation is that, provided that the control vector is in the nominal region, the output parameters go beyond the nominal values due to the same violation on the part of the input parameters. The matrix of the external influence of the operation is introduced. Intervals of values of input and output parameters are considered. Exit of the state vector from the nominal transition area on some of the stages is compensated by changes in the parameters of the control vector, which is modeled by minimizing the elements of the matrix of external influence in order to get its last row close to zero.

Keywords: technological process, technological operation, state vector, relevance vector, product parameters.

Вступ та аналіз попередніх досліджень

Підвищення якості виробів у значній мірі залежить від врахування при проектуванні технологічних процесів взаємного впливу операцій. Це особливо актуально для забезпечення оптимальності проходження, наприклад, механічної обробки виробів, коли технологічний процес складається з декількох операцій, у результаті яких повинна бути досягнута задана якість оброблених поверхонь. Маючи дані про взаємний вплив, можна, керуючи режимами обробки, отримувати високу якість виробу.

Аналіз досліджень з технології машинобудування та моделювання процесів механічної обробки виробів показує, що в ряді робіт [1, 2] технологічний процес розглядається, як складна багатовимірна структурна система, основною структурною одиницею якої є технологічна операція. На вхід системи поступають різні характеристики заготовки, а на виході забезпечується відповідна сукупність характеристик для готового виробу. Тобто технологічний процес характеризується, як процес кількісної та якісної зміни об'єктів виробництва. Досліджується [3] перехід окремих характеристик виробів від однієї операції до іншої. Об'єктом керування у технологічних системах, які мають складну структурно-функціональну організацію є конкретні технологічні процеси. Будь-який конкретний технологічний процес являє собою множину дій, умов та зв'язків. А виробництво складається з етапів, на кожному з яких відбувається певний вплив на матеріальні складові системи. Поширений спосіб моделювання послідовності етапів постає у застосуванні технологічної схеми, кожен елемент якої відповідає певному технологічному процесу [5, 6]. З метою аналізу цієї складної динамічної системи, у рамках якої взаємодіє обладнання, засоби контролю та управління чи інструменти для обробки, технологічний процес розділяється на підсистеми різних рівнів. Така декомпозиція дозволяє розкрити ієрархію структури і розглядати систему на різних рівнях її деталізації [4, 9].

Зокрема, у практиці управління окремими технологічними процесами, яким властиві екстремальні режими функціонування, широко використовуються феномологічні моделі [7]. Вони прості по структурі (звичайно при кількості змінних меншій десяти), досить добре відображають справжню поведінку об'єктів в околі окремих режимів роботи. та ефективні у задачах керування, де мета часто полягає у компенсуванні впливів, що відводять процес від бажаної робочої точки.

Стан технологічного процесу визначається великою кількістю параметрів, що неперервно змінюються (температура, тиск, рівень концентрації компонент та ін). Зміни стану дискретних елементів системи можуть викликати зміни динаміки неперервних складових і миттєві дискретні зміни у них. А вихід неперервних станів за встановлені границі може викликати зміни дискретних станів. При моделюванні [10] розглядається підхід коли неперервні та дискретні процеси є частинними випадками гібридного процесу і весь техпроцес розглядається як сукупність гібридних процесів, що взаємодіють між собою.

Моделі, що застосовують при дослідженні технологічних процесів, розрізняють на аналітичні та системні. Саме останні базуються на тому, як система структурована, та як функціонує. Таким моделям відводиться центральне місце у розвитку математичного моделювання. Як при детермінованому, так і при стохастичному підході до дослідження технологічних процесів, однією з адекватних моделей опису причинно-наслідкових зв'язків між факторами, умовами та діями є мережа Петрі - потужний засіб дослідження дискретних систем [8], який, зокрема, моделює зв'язки між властивостями складових. Взаємний вплив характеристик та складових для окремих операцій досліджувався із застосуванням методів теорії подібності у роботі [11]. Закономірності зміни параметрів при переході від однієї операції до іншої описувались у вигляді так званих коефіцієнтів технологічної спадкоємності, отриманих перетворенням регресійних залежностей, що знаходилися методами планування експерименту. Питання оптимізації багатоопераційного технологічного процесу та його моделювання досліджувались, наприклад, у роботах [4, 7], де для врахування явищ взаємного впливу операцій розглядалися математичні моделі, які описували основні функціональні зв'язки між технологічними факторами та параметрами.

Постановка задачі

На кожному з етапів технологічного процесу виріб можна охарактеризувати скінченною кількістю параметрів, актуальних на даному етапі (для даної технологічної операції). Набір параметрів та їх кількість може змінюватися від входу до виходу кожної операції та від операції до операції. Таким чином, у будь-який момент часу стан виробу характеризується вектором виду $\bar{V} = (v_1, v_2, \dots, v_m)$, якісний сенс координат якого та розмірність m змінюються у ході технологічного процесу, і ці зміни створюють певні незручності при його моделюванні. «Стабілізувати» вектор, який описує стан виробу, можна введенням «фіктивних» параметрів. Складемо вектор $\bar{x} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, координати якого – всі можливі параметри виробу на всіх етапах технологічного процесу, розташовані у фіксованому порядку, а розмірність n – кількість цих параметрів (величина стала). У ході кожної технологічної операції відбувається вплив на певну групу параметрів (координат вектора $\bar{x}$), а інші параметри при цьому або не є актуальними, або зовсім не визначені.

У ході технологічного процесу вектор стану $\bar{x}$ переміщується у просторі станів K з області $X_{\text{поч}} \subset K$ в область $X_{\text{кінц}} \subset K$ по деякій траєкторії L , яка знаходиться в області переходу $X_{\text{пер}} : L \subset X_{\text{пер}}$ (рис. 1). Область $X_{\text{пер}}$ характеризує режими та послідовність операцій.

Простір станів - $K = \prod_{i=1}^n I_i$, де I_i – інтервали зміни параметрів. Негативним наслідком взаємного

впливу технологічних операцій є можливий вихід координат вектора стану з номінальних областей. Необхідна модель, яка може описувати дані явища та їх можливу компенсацію.

Дискретне моделювання. Зіставимо j -й технологічній операції так званий *вектор актуальності* $\bar{P}_j = (p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{jn})$, $j=1, \dots, m$ - бінарний вектор, кожна з координат якого дорівнює одиниці, якщо відповідний параметр є актуальним для даної операції, і дорівнює нулю в іншому випадку (m - загальна кількість технологічних операцій). Параметри будемо називати при цьому, відповідно, суттєвими та фіктивними. Крім того, розглянемо діагональну матрицю

$$P_j = \begin{pmatrix} p_{j1} & & \\ & \ddots & \\ & & p_{jn} \end{pmatrix},$$

яку також будемо називати *матрицею актуальності* j -ї операції.

Введемо операції «проектування» вектору стану на вектор та матрицю актуальності:

$$\bar{X} \mapsto \bar{P}_j \stackrel{\text{def}}{=} (\xi_1 p_{j1}, \xi_2 p_{j2}, \dots, \xi_n p_{jn}) \stackrel{\text{def}}{=} \bar{X}_{\bar{P}_j} \quad (1)$$

$$\bar{X} \mapsto P_j \stackrel{\text{def}}{=} P_j \bar{X}^T \stackrel{\text{def}}{=} \bar{X}_{P_j} \quad (2)$$

При цьому очевидно, $\bar{X}_{\bar{P}_j} = \bar{X}_{P_j}^T$. Після виконання цих операцій значення суттєвих параметрів не змінюються, а на місці фіктивних параметрів утворюються нулі. Домовляємося відрізняти нуль, як ознаку фіктивного параметру, від нуля, як можливого значення суттєвого параметру (для чого, при необхідності можна вводити додаткові позначки).

Зауважимо, що вектор (матриця) актуальності технологічної операції зіставляє їй *підпростір* у просторі станів, а розглянуті операції проектує вектор стану на цей підпростір.

Вектори $\bar{X}_{\bar{P}_j}$ та $\bar{X}_{P_j}$ після проходження даної технологічної операції змінюються, і ці зміни треба внести у загальний вектор стану $\bar{X}$, щоб потім проектувати його на вектор (матрицю) актуальності наступної операції. Для цього вектор $\bar{X}$ спроектуємо на інверсію P_j' вектора (інверсію P_j' матриці) актуальності операції (нулі замінюються одиницями та навпаки), і до отриманого результату додамо змінений вектор $\bar{X}_{\bar{P}_j}$ ($\bar{X}_{P_j}$):

$$\bar{Y} = (\bar{X} \text{ а } P_j') + \bar{X}_{\bar{P}_j} \quad (3)$$

$$\bar{Y}^T = (\bar{X} \mapsto P_j') + \bar{X}_{P_j} \quad (4)$$

де $\bar{Y}$ - новий загальний вектор стану.

Взагалі кажучи, відображення множини технологічних операцій у множину векторів актуальності не є ін'єктивним, тобто один вектор актуальності може відповідати декільком технологічним операціям. Для забезпечення ін'єктивності даного відображення можна ввести додаткові фіктивні параметри (і, відповідно, фіктивні координати вектора актуальності), по яким «схожі» операції будуть відрізнятися. Якщо при цьому розмірність простору станів з урахуванням фіктивних параметрів – n , то множину векторів актуальності можна розглядати як підмножину області визначення деякої булевої функції n змінних. Визначимо булеву функцію так, щоб вона на даній підмножині приймала одиничне, а на його доповненні – нульове значення. Таким чином, даному технологічному процесу відповідає єдина булева функція, що визначає множину векторів актуальності його технологічних операцій, яка може бути реалізована, наприклад, формулами алгебри логіки.

Неперервне моделювання. Позначимо області (інтервали) коливань i -го параметру на вході та на виході j -ї операції відповідно - $\omega_i^{(j)} \subset I_i$ та $\delta_i^{(j)} \subset I_i$, ($j = 1, \dots, m$). Тоді області коливань вектору стану на вході та виході j -ї операції є $\Omega_j = \prod_{i=1}^n \omega_i^{(j)} \subset K$ та $\Delta_j = \prod_{i=1}^n \delta_i^{(j)} \subset K$.

Області змін вхідних та вихідних параметрів об'єднаємо у матриці $\Omega = \|\omega_i^{(j)}\|$ та $\Delta = \|\delta_i^{(j)}\|$. Матриці відповідних номінальних областей змін вхідних та вихідних параметрів позначимо $\mathcal{O} = \|\omega_i^{(j)}\|$ та $\mathcal{X} = \|\delta_i^{(j)}\|$. При цьому $\tilde{\delta}_i^{(j)} \subseteq \tilde{\omega}_i^{(j+1)}$ та $\mathcal{X}_j \subseteq \mathcal{O}_{j+1}$.

Технологічна операція характеризується комплексом керуючих параметрів, які визначають режими обробки. Для j -ї операції позначимо їх $z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_{k_j}^{(j)}$. Вектор $\bar{z}_j = (z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_{k_j}^{(j)})$ є керуючим впливом j -ї операції.

Керуючі можливості j -ї операції характеризуються інтервалами γ варіювання керуючих параметрів z : $z_1^{(j)} \in \gamma_1^{(j)}, z_2^{(j)} \in \gamma_2^{(j)}, \dots, z_{k_j}^{(j)} \in \gamma_{k_j}^{(j)}$, де $\bar{z}_j = (z_1^{(j)}, z_2^{(j)}, \dots, z_{k_j}^{(j)})$ – керуючий вектор (вплив) j -ї операції, а $\gamma_j = \prod_{l=1}^{k_j} \gamma_l^{(j)}$ – її простір управління ($\bar{z}_j \in Y_j$).

Нехай $\bar{x}_{ex}^{(j)} = (\xi_{1_{ex}}^{(j)}, \dots, \xi_{n_{ex}}^{(j)})$; $\bar{x}_{bly}^{(j)} = (\xi_{1_{bly}}^{(j)}, \dots, \xi_{n_{bly}}^{(j)})$ – вектори стану відповідно на вході та виході j -ї технологічної операції, а $\bar{z}_j = (z_1^{(j)}, \dots, z_{k_j}^{(j)})$ – її керуючий вплив. Зв'язок між векторами стану на вході та виході операції має вигляд $\bar{x}_{bly}^{(j)} = F_j(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j)$ де F_j – деяка вектор-функція. У координатній формі

$$\begin{aligned}\xi_{1_{bly}}^{(j)} &= f_1^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j); \\ \xi_{2_{bly}}^{(j)} &= f_2^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j); \\ \xi_{n_{bly}}^{(j)} &= f_n^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j).\end{aligned}\quad (5)$$

Якщо для дослідження використовувались експериментально – статистичні методи, то це можуть бути рівняння регресії $\hat{x}_{bly}^{(j)} = F_j(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j)$, $j = 1, \dots, m$, де $\bar{x}_{ex}^{(j)} \in \Omega_j$, $\bar{z}_j \in Y_j$ а $\hat{x}_{bly}^{(j)}$ – вектор середніх значень параметрів.

Будемо розрізняти *власний* та *зовнішній* впливи технологічної операції на вихідні параметри виробу. Власний вплив j -ї операції полягає у зміні вектора стану $\bar{x}_{bly}$, обумовленого зміною керуючого впливу $\bar{z}_j$ за умови $\bar{x}_{ex}^{(j)} \in \mathcal{O}_j$. Зв'язок між вихідними параметрами та параметрами керуючого впливу визначається системою (5), яку перепишемо у вигляді

$$\begin{aligned}f_1^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j) - \xi_{1_{bly}}^{(j)} &= 0; \\ f_2^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j) - \xi_{2_{bly}}^{(j)} &= 0; \\ f_n^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j) - \xi_{n_{bly}}^{(j)} &= 0.\end{aligned}$$

У відповідності до поняття власного впливу технологічної операції на вихідні параметри виробу, покладемо $\bar{x}_{ex}^{(j)} \in \tilde{\Omega}_j$; $\xi_{bly}^{(j)} \in \tilde{\delta}_i^{(j)}$. Розв'язуючи за цих умов рівняння системи (5) відносно $\bar{z}_j$, отримаємо $\bar{z}_j \in \bar{Z}_i^{(j)}$ ($i = 1, \dots, n$), де $\bar{Z}_i^{(j)}$ – множина розв'язків i -го рівняння ($i = 1, \dots, n$).

Якщо $\bar{x}_{ex}^{(j)} \in \tilde{\Omega}_j$ та $\xi_{bly}^{(j)} \in \tilde{\delta}_i^{(j)}$, то розв'язок $\bar{z}_j$ системи (5) є номінальним вектором керування. Позначимо $|f_i^{(j)}(\bar{x}_{ex}^{(j)}, \bar{z}_j) - \xi_{i_{bly}}^{(j)}| = h_i^j$ та складемо матрицю $H = \|h_i^{(j)}\|$, яку за даних

умов будемо називати матрицею власного впливу даної технологічної операції. Якщо керуючий вектор вийде з номінальної області, то якісь елементи цієї матриці будуть відрізнятися від нуля. При проектуванні технологічного процесу для вибору оптимальних керуючих параметрів треба розв'язувати задачу мінімізації елементів цієї матриці.

Зовнішній вплив j -ї технологічної операції полягає у тому, що за умови знаходження керуючого вектора у номінальній області умови $\xi_{\text{вих}}^{(j)} \in \tilde{\delta}_i^{(j)}$ порушуються з причини невиконання включення $\bar{x}_{\text{ex}}^{(j)} \in \tilde{\Omega}_j$. Для компенсації відхилення вихідних параметрів від номінальних треба шукати розв'язки системи (5) що мінімізують елементи $h_i^{(j)}$ матриці H , яку за даних умов будемо називати матрицею зовнішнього впливу j -ї технологічної операції.

У загальному випадку система (5) може не мати розв'язків, або мати у якості розв'язку керуючий вектор, який не можна реалізувати у даному технологічному процесі. Тоді також треба шукати керуючий вплив, який мінімізує елементи матриці H . Причому, повністю компенсувати зовнішній вплив на властивості готового виробу – означає перетворити останній рядок матриці H на нульовий. Із загальних міркувань зрозуміло, що мінімізація інших елементів матриці сприяє мінімізації її останнього рядку.

Перспективи подальших досліджень. Важливими характеристиками технологічного процесу є області допустимих значень вхідних параметрів технологічних операцій. Вище ми розглядали наступні матриці: $\Omega = \|\omega_i^{(j)}\|$ – матриця «поточних» областей зміни вхідних параметрів; $\tilde{\Omega} = \|\tilde{\omega}_i^{(j)}\|$ – матриця номінальних областей зміни вхідних параметрів. Введемо означення: Допустимою областю зміни параметру $\xi_i^{(j)}$ називається така (максимальна) область $\hat{\omega}_i^{(j)}$, що для будь якого $\xi_i^{(j)} \in \hat{\omega}_i^{(j)}$ існує такий керуючий вектор, що на виході j -ї операції $\bar{x} \in \tilde{\Delta}_j$. Зауважимо, що область $\hat{\omega}_i^{(j)}$ максимальна у тому сенсі, що для будь якого $\xi_i^{(j)} \notin \hat{\omega}_i^{(j)}$ такого керуючого вектора $\bar{x}$ не існує. Звісно, множина $\hat{\omega}_i^{(j)}$ може виявитися порожньою. Тобто може не бути такого значення $\xi_i^{(j)}$, для якого існує потрібний керуючий вектор.

Введемо у розгляд так званий *вектор допустимих областей вхідних параметрів j -ї операції*: $\hat{\Omega}^{(j)} = (\hat{\omega}_1^{(j)}; \hat{\omega}_1^{(j)}; \dots; \hat{\omega}_n^{(j)})$ та наступні «індикаторні» функції

$$f_i(\bar{x}) = \begin{cases} 1, \xi_i \in \hat{\omega}_i \\ 0, \xi_i \notin \hat{\omega}_i \end{cases} \quad \text{та} \quad f(\bar{x}) = \begin{cases} 1, \bar{x} \in \hat{\Omega} \\ 0, \bar{x} \notin \hat{\Omega} \end{cases}.$$

Очевидно, що $f(\bar{x}) = 1$ тоді та тільки тоді, коли $\sum_{i=1}^n f_i(\bar{x}) = n$.

Якщо технологія дозволяє вимірювати параметри виробу на вході операцій, то виконання умови $f(\bar{x}) = 1$ означає, що технологічний процес проходить у штатному режимі. Виникає питання про зв'язок цієї умови з векторами актуальності операцій. Бо якісь параметри формально не є актуальними для даної операції, вони не піддаються впливу при її здійсненні. Але вони можуть впливати на якість виконання операції, тобто на актуальні параметри. Наприклад, при виконанні якоїсь операції відбулося порушення режиму обробки, скажімо, перегрів виробу з подальшим неправильним охолодженням, після чого змінилась твердість матеріалу (зникло загартовування). А на одній з наступних операцій проводиться шліфівка поверхні, і відбуваються «задери», тобто проявляється так звана прихована технологічна спадкоємність. Якщо б перед шліфівкою була відповідна інформація, можна було би змінити режими (використати більш тонкий абразивний матеріал, або застосувати спеціальні пасти). У цьому прикладі твердість матеріалу не була актуальним параметром для готового виробу, а мала значення тільки для виконання однієї конкретної операції.

Можна ввести у розгляд так звані «*вектори впливу*» даної технологічної операції – бінарні вектори з одиницями на відповідних місцях. У розглянутому прикладі негативний вплив на операцію шліфування здійснив параметр «твердість поверхні» - параметр, який важко контролювати. Виглядає простішим контролювати порушення режимів обробки, яке і призвело до описаного результату.

Таким чином, здається перспективним ввести поняття «*вектору впливу*» для керуючого вектору $\bar{z}$ даної технологічної операції. Бінарний характер вектору впливу дозволить враховувати сам факт залежності параметрів виробу від режимів попередніх операцій, але не дає уявлення про степінь цієї залежності. Має сенс ввести вектори впливу, координати яких – вагові коефіцієнти, наприклад, $0 \leq \alpha \leq 1$. Близькість α до одиниці казатиме про високу степінь залежності параметру від режиму однієї з попередніх операцій, а близькість до нуля – про низьку степінь. Також бачиться важливою задачею складання технологічних карт операцій та всього технологічного процесу з врахуванням отриманих векторів впливу.

Технологічний процес «просуває» виріб, точніше, вектор стану у просторі станів (рис. 1).

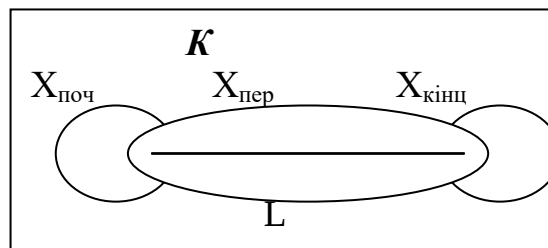


Рис. 1 – Проходження вектору стану у ході техпроцесу

Траєкторія просування лежить в області переходу. Якщо мова йде про одну операцію, то $X_{\text{поч}}$ та $X_{\text{кінц}}$ у наших позначеннях – це області Ω та Δ , а $X_{\text{пер}}$ – область, яка описує динаміку зміни параметрів виробу у ході технологічної операції. Якщо ж мається на увазі весь технологічний процес, то $X_{\text{поч}}$ поєднує у собі параметри заготовки, а $X_{\text{кінц}}$ – параметри готового виробу. Тоді $X_{\text{пер}}$ містить відповідні області $X_{\text{поч}}$ та $X_{\text{кінц}}$ усіх проміжних операцій. Задача забезпечення нормального ходу технологічного процесу полягає у тому, щоб не дати вектору стану $\bar{x}$ вийти за межі області допустимих траєкторій $X_{\text{пер}}$. Однак вихід за цю область може відбутися набагато пізніше, ніж дії, які його спричинили (як було відмічено у прикладі). Для описання компенсаційних можливостей та планування механізму компенсації здається доцільним введення понять *вектору чи матриці компенсаційних можливостей*, що може доповнювати згадані технологічні карти операцій та усього технологічного процесу.

Висновки

Розглянуті підходи до моделювання багатоопераційного технологічного процесу дозволяють описувати його булевою функцією, яка визначає множину векторів актуальності технологічних операцій, та враховувати і компенсувати взаємний вплив операцій локальними керуючими поправками, оптимізуючи вибір режимів обробки. Власний вплив технологічної операції, тобто той, що обумовлений зміною керуючого впливу, характеризується матрицею, елементи якої становляться відмінними від нуля, якщо керуючий вектор виходитиме з номінальної області. Тому для вибору оптимальних керуючих параметрів треба розв'язувати задачу мінімізації елементів цієї матриці. Зовнішній вплив операції, обумовлений відхиленням вхідних параметрів від номінальних, компенсується пошуком відповідного керуючого вектору, який мінімізує елементи матриці зовнішнього впливу. Повна компенсація зовнішнього впливу на властивості готового виробу означає перетворення останнього рядку матриці на нульовий, чому сприяє мінімізація інших елементів матриці.

Список використаних джерел:

1. Наконечний С. І. Математичне моделювання техніко-економічних процесів АПК / С. І. Наконечний, С. С. Савіна, Т. С. Наконечний. – Київ, 1996. – 240 с.
2. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки / В. Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 616 с.
3. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень : навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2013.
4. Тихонов А. Н. Математическое моделирование технологических процессов и метод обратных задач в машиностроении / А. Н. Тихонов, В. Д. Кальнер, В. Б. Гласко. – М. : Машиностроение, 1990. – 264 с.
5. Павленко П. М. Основи математичного моделювання систем і процесів : навч. посіб. / П. М. Павленко. – Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2013. – 201 с.
6. Станжицький О. М. Основи математичного моделювання : навч. посібник / О. М. Станжицький, Є. Ю. Таран, Л. Д. Гординський. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2006. – 296 с.
7. Modeling, Simulation and Optimization for Science and Technology / Ed. : W. Fitzgibbon, Y. A. Kuznetsov, P. Neittaanmäki, O. Pironneau. – Springer. Dordrecht, 2014. – 248 p.
8. Discrete Abstractions of Hybrid Systems / Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J. // Proceedings of the IEEE. – 2000. – No. 88. – P. 971–984.
9. Bender E. A. An Introduction to Mathematical Modeling / E. A. Bender. – 2012. – Access mode <https://www.vitalsource.com/products/an-introduction-to-mathematical-modeling-edward-a-bender-v9780486137124>. (Last access 28.04.2023).
10. Numerical simulation of ferrite/austenite phase fraction in multipass welds of duplex stainless steels. Mathematical modelling of weld phenomena 12 / Ogura T., Matsumura T., Yu L. et al. // Proc. of Intern. Sem. Numerical Analysis of Weldability, Graz, Austria. – 2018. DOI 0.3217/978-3-85125-615-4-07
11. Пташний О. Д. Моделирование технологического процесса шлифования магнитопроводов / О. Д. Пташний // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2004. – № 4 (10). – С. 109–111.

References:

1. Nakonechnyi, SI, Savina, SS & Nakonechnyi, TS 1996, *Matematychnye modeliuвання tekhniko-ekonomichnykh protsesiv APK*, [Mathematical modeling of technical and economic processes of the AIC], Kyiv.
2. Strutynskiy, VB 2001, *Matematychnye modeliuвання protsesiv ta system mekhaniky* [Mathematical modeling of processes and systems of mechanics], ZhITI, Zhytomyr.
3. Kvietnyi, RN 2013, *Kompiuterne modeliuвання system ta protsesiv. Metody obchyslen*, [Computer modeling of systems and processes. Methods of calculations: a textbook], VNTU, Vinnytsia.
4. Tihonov, AN, Kal'ner, VD & Glasko, VB 1990, *Matematicheskoe modelirovanie tehnologicheskikh processov i metod ob-ratnykh zadach v mashinostroenii*, [Mathematical modeling of technological processes and the method of inverse tasks in mechanical engineering], Mashinostroenie, Moskva.
5. Pavlenko, PM 2013, *Osnovy matematychnoho modeliuвання system i protsesiv*, [Fundamentals of mathematical modeling of systems and processes: a textbook], Knyzhkove vyd-vo NAU, Kyiv.
6. Stanzhytskyi, OM, Taran, YY & Hordynskiy, LD 2006, *Osnovy matematychnoho modeliuвання*, [Fundamentals of mathematical modeling: a textbook], Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr “Kyivskiy universytet”, Kyiv.
7. Fitzgibbon, W (ed.), Kuznetsov, YA (ed.), Neittaanmäki, P (ed.) & Pironneau, O (ed.) 2014, *Modeling, Simulation and Optimization for Science and Technology*, Springer. Dordrecht.
8. Alur, R, Henzinger, TA, Lafferriere, G & Pappas, GJ 2000, ‘Discrete Abstractions of Hybrid Systems’ *Proceedings of the IEEE*, no. 88, Pp. 971–984.
9. Bender, EA 2012, *An Introduction to Mathematical Modeling*, Dover Publications, viewed 28 April 2023 < <https://www.vitalsource.com/products/an-introduction-to-mathematical-modeling-edward-a-bender-v9780486137124>>.
10. Ogura, T, Matsumura, T, Yu, L et al. 2018, ‘Numerical simulation of ferrite/austenite phase fraction in multipass welds of duplex stainless steels. Mathematical modelling of weld phenomena 12’, In *Proc. of Intern. Sem. Numerical Analysis of Weldability, Graz, Austria*. DOI 0.3217/978-3-85125-615-4-07.
11. Ptashnyj, OD 2004, ‘Modelirovanie tehnologicheskogo processa shlifovaniya magnitoprovodov’, [Simulation of the technological process of grinding magnetic cores], *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tehnologij*, no 4, Pp. 109–111.

Стаття надійшла до редакції 01 червня 2023 року

АНАЛІЗ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ

© Стрельчук Р.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Інформація про автора:

Стрельчук Роман Михайлович (Strelchuk Roman): ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Запропоновано методику розрахунку складових сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів, що сприяє вибору оптимальних режимів обробки за один установ поверхонь деталей машин. Наведено приклад розрахунку за даною методикою складових сили різання при плоскому врізному шліфуванні. Нормальну складову сили різання при цьому розраховують не тільки на торці, а й на периферії круга, враховуючи вплив різальних та деформуючих кромek. Проведено аналіз існуючих математичних залежностей для визначення сили різання при плоскому алмазному врізному шліфуванні. Значення сили різання, що діє при шліфуванні, є найважливішою характеристикою процесу обробки. Від неї залежать умови роботи верстата, інструменту та рівень точності деталі, що отримується. Розроблена методика визначення складових сили різання при шліфуванні враховує вплив не тільки різальних зерен, а й деформуючих, де сумарні нормальна та тангенціальна складові сили різання діють уздовж лінії контакту як на периферії, так і на торці шліфувального круга. Товщину шару, що зрізається, розрахована за умови рівності обсягів підведеного і зрізаного матеріалу, враховуючи податливість системи і переривчастість електричних разрядів за рахунок зміни полярності електродів. На базі розробленої методики виконано розрахунок складових сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів. Чорнове шліфування здійснювали торцем круга, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, а чистове шліфування та калібрування – розвантаженою ділянкою периферії круга, що забезпечує його високу стійкість. Нормальна складова сили різання, яка має максимальне значення на торці круга, практично не впливає на точність формоутворення деталі, оскільки вона розташована паралельно до її осі. Дану методику можна використовувати для різних видів шліфування, а також для дослідження теплонапруженості процесу, оптимізації та продуктивності механічної обробки.

Ключові слова: зона обробки, нормальні та дотичні напруги, швидкість деформації та температури, круг, деталь.

Strelchuk R. «Analysis of cutting force in electrical discharge grinding with change polarity of electrodes»

A methodology for calculating the components of the cutting force during electroerosion grinding with variable electrode polarity is proposed, which helps to choose the optimal processing modes for one installation of the surfaces of machine parts. An example of calculating the components of the cutting force during flat mortise grinding using this method is given. In this case, the normal component of the cutting force is calculated not only on the end face, but also on the periphery of the circle, taking into account the influence of cutting and deforming edges. An analysis of the existing mathematical dependencies for determining the cutting force during flat diamond mortise grinding was carried out. The value of the cutting force acting during grinding is

the most important characteristic of the processing process. It depends on the working conditions of the machine, the tool and the level of accuracy of the obtained part. The developed methodology for determining cutting force components during grinding takes into account the effects of both cutting and deformable grains. Consequently, the total normal and tangential cutting force components act along the contact line, both at the periphery and the end of the grinding wheel. The thickness of the sheared layer is calculated on the condition that the volumes of the supplied and sheared material are equal, taking into account the flexibility of the system and the intermittence of electric discharges due to changing the polarity of the electrodes. Based on the developed methodology, the components of the cutting force were calculated during electroerosion grinding with variable electrode polarity. Rough grinding was performed with the end face of the wheel, semi-clean – with a transitional radius edge, and fine grinding and calibration – with an unloaded area of the wheel's periphery, which ensures its high stability. The normal component of the cutting force, which has a maximum value at the end of the circle, practically does not affect the accuracy of forming the part, since it is located parallel to its axis. This technique can be used for various types of grinding, as well as for the study of thermal stress of the process, optimization and productivity of mechanical processing.

Keywords: machining zone, normal and tangential stresses, strain rate and temperature, circle, detail.

Вступ

Характер взаємодії робочої поверхні круга з матеріалом в умовах електроерозійного алмазного шліфування з полярністю електродів, що змінюється, при обробці різних важкооброблюваних матеріалів не вивчений. У зв'язку з цим цікавий аналіз таких показників процесу, як сили різання. Вони відбивають процес різання у поступовій динаміці, вплив температурно-скоростного чинника, властивостей оброблюваного матеріалу, стан робочої поверхні круга. При великих значеннях сили P_z взаємодія абразивного інструменту з матеріалом ефективніше. Слід зазначити, що за умов пружного шліфування більшому значенню сили P_z відповідає краща ефективність процесу шліфування, оскільки тангенціальне зусилля визначається сумарним миттєвим перерізом зрізу. Для розрахунку інтенсивності видалення зв'язки круга та передзруйнованого шару оброблюваного матеріалу в результаті дії електричних розрядів необхідно мати силові залежності, що описують збільшення складових сил різання в часі, обумовлене зміною параметрів поверхні круга і деталі, та знати умови стійкого закріплення алмазного зерна у зв'язці.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Для досягнення найбільш раціональних режимів обробки часто використовуються залежності складових сили різання, які, у свою чергу, залежать не тільки від режиму різання, а й від багатьох інших факторів, серед яких дуже суттєвим є площа контакту шліфувального круга з поверхнею, що обробляється [1,2]. У роботах [3,4] визначено ступінь впливу площі контакту робочої поверхні круга для конкретних умов обробки на радіальну P_y та тангенціальну P_z складові сили різання, величина якої знаходиться в межах $n = 0,6-0,9$, що підтверджує значущість фактора, що розглядається.

Іноді за зміни площі контакту круга з деталлю щодо сил різання для більш об'єктивної оцінки розглядаються їх питомі складові, проте більшість технологічних завдань необхідне знання абсолютних значень. У роботі розглядається процес електроерозійного шліфування торцем круга за пружною схемою плоскої поверхні, ширина якої можна порівняти з шириною робочої поверхні круга, а контакт здійснюється в одній зоні різання за рахунок нахилу осі обертання шліфувального круга.

Методика дослідження

Сила різання на шліфувальному крузі являє собою суму сил на окремих зернах, що одночасно знаходяться в контакті з поверхнею деталі, у зв'язку з чим спочатку визначимо силу різання на одиничному зерні.

При визначенні рівнодіючої сили різання виходитимемо з рівноваги ряду активних (зовнішніх) сил, що діють на шар, що зрізається, і реактивних (внутрішніх) сил, що діють на алмазне зерно (рис.1). До цих сил належать: нормальна сила N , з якою передня поверхня діє на шар, що зрізається, сила тертя стружки по передній поверхні F , сила нормального тиску N_3 задньої поверхні на поверхню різання та сила тертя F_3 поверхні різання об задню поверхню зерна. Складаючись, сила N та F утворюють силу стружкоутворення R_s , нахилену до поверхні різання під кутом дії ω .

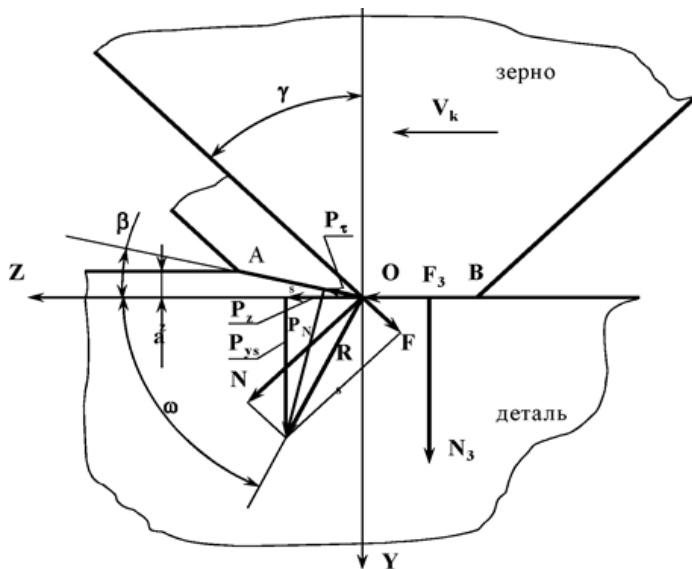


Рис. 1 – Схема дії сил при електроерозійному шліфуванні на шар, що зрізається

Розкладемо силу стружкоутворення R_s на дві: силу P_N , перпендикулярну умовній площині зсуву OA , та силу P_τ , діючу вздовж площини зсуву. Сила P_N стискає шар, що зсувається, а сила P_τ зрушує його вздовж умовної площини зсуву. При цьому зсувна деформація починається в тому випадку, коли напруга зсуву стає рівною межі плинності оброблюваного матеріалу на зсув τ_s [5]. Для визначення складових сили різання P_z та P_y сумісний початок координат з точкою O і розкладемо силу стружкоутворення на дві складові P_{zs} та P_{ys} , діють у напрямі осей Z та Y . Тоді отримаємо наступні залежності:

$$P_z = \sum_{i=1}^n P_{iz} = P_{zs} + F_3, \quad (1)$$

$$P_y = \sum_{i=1}^n P_{iy} = P_{ys} + N_3. \quad (2)$$

З рис. 1 можна визначити:

$$P_{zs} = R_s \cos \omega, \quad (3)$$

$$P_{ys} = R_s \sin \omega, \quad (4)$$

$$R_s = \sqrt{P_\tau^2 + P_N^2} \quad (5)$$

Таким чином, визначення P_z і P_y зводиться до знаходження P_τ , P_N , N_3 , F_3 та кута дії ω . Для розрахунку P_τ , P_N , N_3 , F_3 скористаємося законами розподілу нормальних та дотичних напруг в умовній площині зсуву OA та в зоні контакту поверхні різання із задньою поверхнею зерна. Базуючись на аналізі досліджень [6,7], розподіл нормальних та дотичних напруг уздовж умовної площини зсуву приймемо рівномірним із співвідношенням:

$$\frac{\sigma}{\tau_s} = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right), \quad (6)$$

а розподіл нормальних напруг вздовж майданчика контакту задньої поверхні зерна описуватимемо трьома законами: лінійним, комбінованим і рівномірним (рис.2).

Тоді середня величина нормальних напруг на майданчику контакту задньої поверхні може бути розрахована за формулою:

$$\sigma_{cp} = \kappa_3 \sigma, \quad (7)$$

де κ_3 – коефіцієнт, що враховує закон розподілу нормальних напруг на майданчику контакту задньої поверхні збіжжя з поверхнею різання. За лінійного закону розподілу $\kappa_3 = 0,5$; при комбінованому – 0,75 та рівномірному – 1.

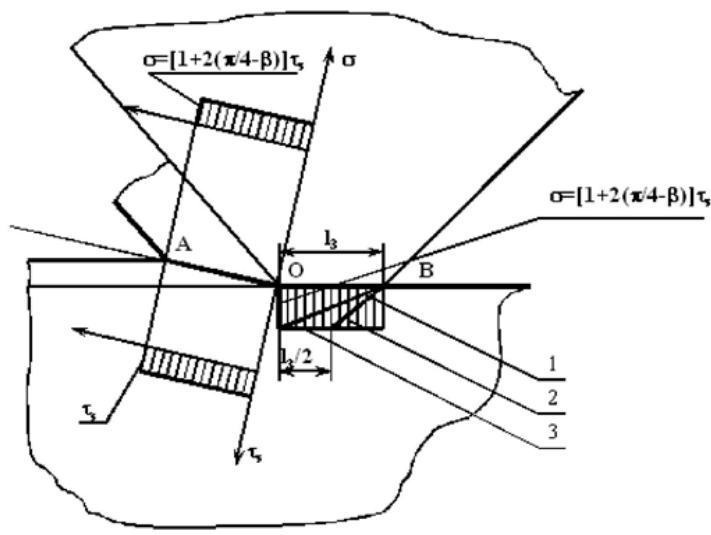


Рис. 2 – Закони розподілу нормальних та дотичних напруг вздовж умовної площини зсуву і в зоні контакту задньої поверхні з деталлю
1 – лінійний; 2 – комбінований;
3 – рівномірний

З рис.1 і рис.2 знайдемо співвідношення $P\tau$, P_N :

$$P_\tau = \tau_s OA = \frac{a_z b \tau_s}{\sin \beta}, \quad (8)$$

де a_z , b – товщина та ширина зрізу одиничним зерном.

$$P_N = \frac{a_z b}{\sin \beta} \sigma. \quad (9)$$

Тоді, з урахуванням відносин σ/τ_s :

$$P_N = \frac{a_z b}{\sin \beta} \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right] \tau_s. \quad (10)$$

Підставляючи вирази (8) і (10) у залежність (5) отримаємо:

$$R_s = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right]^2 a_z b}}{\sin \beta} \tau_s. \quad (11)$$

Визначимо кут між положенням рівнодіючої R_s та умовною площиною зсуву, використовуючи залежності (8) та (10):

$$\operatorname{tg}(\beta + \omega) = \frac{P_N}{P_\tau} = \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right]. \quad (12)$$

Кут зсуву виразний через величину γ і коефіцієнт усадки стружки KL [8,9]:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \quad (13)$$

Кут дії ω розрахуємо, використовуючи залежності (12) та (13):

$$\omega = \operatorname{arctg} \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \beta \right) \right] - \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma}. \quad (14)$$

Складові P_{zs} та P_{ys} визначимо за формулами (3), (4) з урахуванням (11):

$$P_{zs} = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right]^2} a_z b}{\sin \beta} \tau_s \cos \omega, \quad (15)$$

$$P_{ys} = \frac{\sqrt{1 + \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right]^2} a_z b}{\sin \beta} \tau_s \sin \omega. \quad (16)$$

Величину сили N_3 , з якою зерно майданчиком контакту діє поверхню різання, визначимо з урахуванням відносини σ/τ_s :

$$N_3 = \sigma_{cp} b l_3 = \kappa_3 \sigma b l_3 = \kappa_3 \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] \tau_s \sigma b l_3. \quad (17)$$

Силу тертя F_3 на майданчику зносу розрахуємо з використанням коефіцієнта тертя задньої поверхні зерна μ по поверхні різання і величини сили нормального тиску N_3 :

$$F_3 = \mu N_3 = \kappa_3 \left[1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)\right] \tau_s b l_3 \mu. \quad (18)$$

Сумарні тангенціальні та радіальні складові сили різання знайдемо, підставивши в (1) та (2) значення з (15), (16), (17), (18):

$$P_z = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s, \quad (19)$$

$$P_y = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s, \quad (20)$$

$$\text{де } M = 1 + 2\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right).$$

Результати дослідження

Сили різання, що діють на одиничне зерно, аналогічні наведеним, проте спрямовані у протилежний бік. Сили різання, що діють на шліфувальне коло, розрахуємо використовуючи значення сил на одиничному зерні, а також кількість різальних зерен, що одночасно перебувають у роботі в межах зони контакту деталі зі шліфувальним кругом:

$$P_{zk} = P_z z_p,$$

$$P_{yk} = P_y z_p.$$

Тоді підставивши в ці формули вирази (19) та (20) отримаємо наступні співвідношення:

$$P_{zk} = \left(\frac{\sqrt{1 + M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s z_p, \quad (21)$$

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \tau_s z_p. \quad (22)$$

Вплив швидкості деформації та температури в умовах шліфування на τ_s врахуємо за допомогою модифікації наведеної в роботі [10];, перетворивши з урахуванням модифікації залежність мікротвердості оброблюваного матеріалу HV від температури, отриману при стандартних методах випробувань, та апроксимувавши залежність $HV=f(T)$ лінійною функцією [11]:

$$\tau_s = C - \alpha T, \quad (23)$$

де T – температура різання, °K; C, α – початкова ордината та кутовий коефіцієнт [12].

Тоді, після підстановки (23) (21) будемо мати:

$$P_{zk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p (C - \alpha T). \quad (24)$$

Температуру резания T определим как максимальную температуру на поверхности детали под источником тепла [13,14]:

$$T_{max} = \frac{2qa}{\pi \lambda V_\delta} \sqrt{2\pi 2H}, \quad (25)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт / (см); a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м/с; λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м°K); V_δ – швидкість деталі, м / с; H – безрозмірна півширина джерела.

Визначимо густину теплового потоку з формули (25):

$$q = \frac{\alpha_6 P_{zk} V_k}{JS}, \quad (26)$$

де P_{zk} – тангенційна складова сили різання на шліфувальному колі, Н; V_k – швидкість шліфувального круга, м/с; S – площа зони контакту деталі із колом, м; α_6 – коефіцієнт введення, що враховує частку тепла, що надходить у деталь; J – механічний еквівалент ($J = 1$). Після підстановки (26) (25), а потім (24) і відповідних перетворень, отримаємо:

$$P_{zk} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\delta S}}. \quad (27)$$

Складову сили різання P_{yk} отримаємо після підстановки значення τ_s з урахуванням (23), (25), (26):

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \left(C - \frac{4a\alpha V_k \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\delta S} P_{zk} \right). \quad (28)$$

Для розрахунку складових сил різання на одиничному зерні, розділимо вирази (27) і (28) на кількість зерен, що одночасно працюють.

$$P_{zk} = \frac{\left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b C}{1 + \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b z_p \frac{4 a \alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_o S}}, \quad (29)$$

$$P_{yk} = \left(\frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) b \left(C - \frac{4 a \alpha V_k \sqrt{H} \alpha_e}{\sqrt{\pi} \lambda V_o S} P_{zk} \right). \quad (30)$$

Коректність формул (29), (30) при розрахунку складових сил різання в процесі плоского алмазного врізного шліфування сталі Р6М5 кругами з алмазів АС6 зернистістю 50/40, 100/80, 160/125 була підтверджена експериментально (рис.3). При цьому розбіжність теоретично розрахованих та певних експериментально величин складових сили різання знаходиться в межах 15-25%. Дещо більша розбіжність спостерігається при зіставленні величин складової P_y , особливо для круга зернистістю 50/40 (до 35%). Це зниженням профілю алмазного круга, що у найбільшій мірою проявляється на дрібнозернистому крузі і чого не враховує розроблена методика розрахунку.

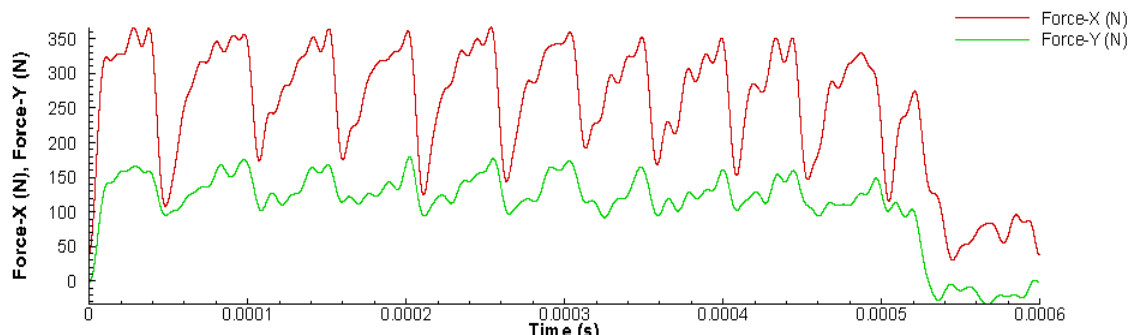
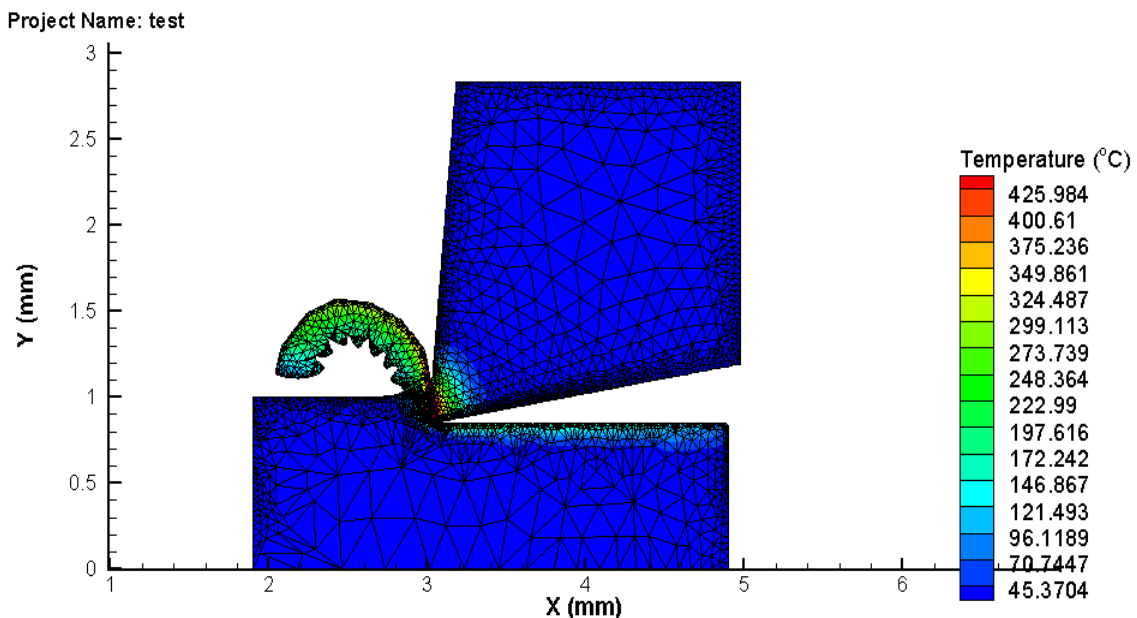


Рис. 3 – Експериментальні значення складових сил різання в процесі плоского врізного алмазного шліфування

Висновки

Проведено аналіз існуючих математичних залежностей для визначення сили різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів. Значення сили різання, що діє при шліфуванні, є найважливішою характеристикою процесу обробки. Від неї залежать умови роботи верстата, інструменту та рівень точності деталі, що отримується. Розроблено методику визначення складових сили різання при шліфуванні враховує вплив не тільки ріжучих зерен, а й деформуючих, де сумарні нормальна та тангенціальна складові сили різання діють уздовж лінії контакту як на периферії, так і на торці шліфувального круга. Товщину шару, що зрізається, розрахована з умови рівності обсягів підведеного і зрізаного матеріалу, враховуючи податливість системи і переривчастість круга. На базі розробленої методики виконано розрахунок складових сили різання при плоскому врізному шліфуванні. Чорнове шліфування здійснювали торцем круга, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, а чистове шліфування та калібрування – розвантаженою ділянкою периферії круга, що забезпечує його високу стійкість. Нормальна складова сили різання, яка має максимальне значення на торці круга, практично не впливає на точність формоутворення деталі, оскільки вона розташована паралельно до її осі. Дану методику можна використовувати для різних видів шліфування, а також для дослідження теплонапруженості процесу, оптимізації та продуктивності механічної обробки.

Список використаної літератури:

1. Пат. 131894UA, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р. М., Узунян М. Д. – № u 201806851 ; заявл. 18.06.2018 ; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
2. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders / J. Montes, F. Cuevas, F. Reina [et al.] // *Metals and Materials International*. – 2020. – № 7. – Pp. 1045–1059.
3. Aurich J. C. Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel / J. C. Aurich, H. Sudermann, O. Braun // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2006. – № 220(4). – Pp. 489–497. doi: 10.1243/095440505X32706.
4. Strelchuk R. M. Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening / R. M. Strelchuk, S. M. Trokhimchuk // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2021. – № 1. – Pp. 53–59. doi: 10.33271/nvngu/2021-1/053.
5. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity / R. Strelchuk, O. Shelkovyi // *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV* : Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine. – 2021. – Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering. – Pp. 143–152. doi: 10.1007/978-3-030-77719-7_15.
6. Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrodes / Strelchuk R., O. Shelkovyi, Y. Gutsalenko, C. Iancu, V. Subbotina, S. Knyazev, O. Volkov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2022. – Pp. 1235–1241. doi: 10.1088/1757-899X/1235/1/012023.
7. Surface integrity in material removal processes: Recent advances / Jawahir, I. S., E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D. K. Aspinwall, J. C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A. D. Jayal // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2011. – № 60(2). – Pp. 603–626. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.
8. Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests / Klocke, F., C. Wirtz, S. Mueller, P. Mattfeld // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – Pp. 209–213. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.209.
9. Xianbing L. Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings / Liu, Xianbing, Bi Zhang // *Journal of Materials Science*. – 2002. – № 37(15). – Pp. 3229–3239. doi: 10.1023/A:1016174731658.
10. Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites / Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu, Zhuming Bi // *Ceramics International*. – 2017. – № 43(18). – Pp. 16539–16547. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.040.
11. Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina / Muttamara, A., Y. Fukuzawa, N. Mohri, T. Tani // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2009. – № 209(5). – Pp. 2545–2552. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.018.

12. Rahim M. Z. Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity / Rahim, M. Z., S. Ding, J. Mo // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1025–1026. – Pp. 628–632. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.628.

13. Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics / Rao, X., F. Zhang, C. Li, Y. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – № 94(5–8). – Pp. 2751–2762. doi: 10.1007/s00170-017-1102-7.

14. Agrawal S. S. Modeling and prediction of material removal rate and surface roughness in surface-electrical discharge diamond grinding process of metal matrix composites / S. S. Agrawal, V. Yadava // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2013. – № 28(4). – Pp. 381–389. doi: 10.1080/10426914.2013.763678.

References:

1. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoi poliarnistiu elektrodiv*, [Method of electrical discharge diamond grinding with alternating electrode polarity], UA Patent 131894.

2. Montes, J, Cuevas, F, Reina, F & at all 2020, 'Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders' *Metals and Materials International*, no 7, Pp. 1045–1059.

3. Aurich, JC, Sudermann, H & Braun, O 2006, 'Experimental investigation of burr formation in the surface grinding of tool steel' *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, no 220(4), Pp. 489–497. doi: 10.1243/095440505X32706.

4. Strelchuk, RM, Trokhimchuk, SM 2021, 'Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening' *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no 1, Pp. 53–59. doi: 10.33271/nvngu/2021-1/053.

5. Strelchuk, R & Shelkovyi, O 2021, 'Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity' *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV* :

Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine, Vol. 1: Manufacturing and Materials Engineering, Pp. 143–152. doi: 10.1007/978-3-030-77719-7_15.

6. Strelchuk, R, Shelkovyi, O, Gutsalenko, Y, Iancu, C, Subbotina, V, Knyazev, S & Volkov, O 2022, 'Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrodes' *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Pp. 1235–1241. doi: 10.1088/1757-899X/1235/1/012023.

7. Jawahir, IS, Brinksmeier, E, M'Saoubi, R, Aspinwall, DK, Outeiro, JC, Meyer, D, Umbrello, D & Jayal, AD 2011, 'Surface integrity in material removal processes: Recent advances' *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, no 60(2), Pp. 603–626. doi: 10.1016/j.cirp.2011.05.002.

8. Klocke, F, Wirtz, C, Mueller, S & Mattfeld, P 2016, 'Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests' *Procedia CIRP*, Vol. 46, Pp. 209–213. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.209.

9. Xianbing, L & Zhang, L 2002, 'Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings' *Journal of Materials Science*, no 37, Pp. 3229–3239. doi: 10.1023/A:1016174731658.

10. Cong, M, Liang, C, Zhang, Y, Zhang, M, Hu, Y & Bi, Z 2017, 'Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites' *Ceramics International*, no 43(18), Pp. 16539–16547. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.09.040.

11. Muttamara, A, Fukuzawa, Y, Mohri, N & Tani, T 2009, 'Effect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina' *Journal of Materials Processing Technology*, no 209(5), Pp. 2545–2552. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.018.

12. Rahim, MZ, Ding, S & Mo, J 2014, 'Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity' *Advanced Materials Research*, Vol. 1025–1026, Pp. 628–632. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.628.

13. Rao, X, Zhang, F, Li, C & Li, Y 2018, 'Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics' *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no 94(5–8), Pp. 2751–2762. doi: 10.1007/s00170-017-1102-7.

14. Agrawal, SS & Yadava, V 2013, 'Modeling and prediction of material removal rate and surface roughness in surface-electrical discharge diamond grinding process of metal matrix composites' *Materials and Manufacturing Processes*, no 28(4), Pp. 381–389. doi: 10.1080/10426914.2013.763678.

Стаття надійшла до редакції 10 травня 2023 р.

ДІАГНОСТИКА І ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОСУ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРОБЦІ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

© Бринюк М.С., Кондратюк О.Л., Марков В.О., Скоркін А.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Бринюк Максим Сергійович (Bryniuk Maksym): ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-2974-8818>; e-mail: Maksimysimi@gmail.com, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович (Kondratyuk Oleh): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3263-0483>; e-mail: kondratyuk.mot@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Марков Владлен Олегович (Markov Vladlen): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0625-6934>; e-mail: marik.markov.1997@gmail.com, аспірант кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Скоркін Антон Олегович (Skorkin Anton): ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3032-83414>; e-mail: Antonskorkin20@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглядається один із варіантів вирішення однієї з найважливіших проблем обробки матеріалів різанням – прогнозування ресурсу різального лезового інструменту та розробки на цій основі нового методу діагностування його технічного стану, що й запобігло актуальності представленого у статті матеріалу. При цьому під ресурсом розуміється період стійкості інструменту між переточуванням, тому що тривалість експлуатації інструменту, що не вимагає переточування, найбільш просто піддається автоматичному контролю.

Метою досліджень, результати яких викладені в цій статті, є створення методу прогнозування ресурсу різального інструменту, що ґрунтується на безперервному контролі в процесі різання величини тиску звуку, що супроводжує обробку різанням.

У процесі досліджень було використано методи: системного аналізу, теорії різання, теорії коливань та ідентифікації, що виконується методом випадкового пошуку. Розглянуто динамічну поведінку металообробної технологічної системи при зношуванні ріжучого інструменту.

В результаті проведених досліджень розроблено метод прогнозування ресурсу ріжучого інструменту, що ґрунтується на ідентифікації параметрів прогнозної моделі за результатами безперервного контролю сигналів віброакустичної емісії (BAE) за величиною, що супроводжує процес різання. Причому модель складена таким чином, що шуканий ресурс включений до її математичної структури, що дозволяє виключити використання під час прогнозування статистично ненадійних критеріальних параметрів, що описують граничний стан інструменту.

Розроблено модель прогнозування технічного стану технологічної системи, що дозволяє оцінювати ресурс як інструменту, і технологічної системи загалом. Знання ресурсу технологічної системи забезпечує перехід до адаптивного управління її функціонуванням і виключає цим непередбачені зупинки заміну інструменту, ремонт верстата і зводить до мінімуму ризик появи браку обробленої деталі. Розроблений автоматизований прогнозно-діагностичний комплекс забезпечує використання запропонованої прогнозної моделі у практику обробки широкого кола матеріалів, що у результаті вирішує важливе науково-практичне завдання підвищення ефективності процесу різання.

Ключові слова: технологічна система, контроль, діагностування, якість виготовлення, модель прогнозування, ресурс інструменту, ефективність процесу різання.

Bryniuk M., Kondratyuk O., Markov V., Skorkin A. “Diagnostics and predictive analysis of the wear of a cutting tool when processing on CNC machines”

This article addresses a significant issue in material processing, specifically the forecasting of cutting blade tool resources and the development of a novel method to diagnose the criticality of its technical condition. The concept of resource refers to the period of the tool wear before resharpening, since the duration of the tool operation, which does not require resharpening, is the easiest to control automatically.

This article presents the outcomes of research aimed at developing a method for forecasting the resource of a cutting tool by continuously monitoring the sound pressure level during the cutting process.

The investigation employed system analysis, cutting theory, oscillation theory, and identification methods through random search. The study focused on analyzing the dynamic behavior of the metalworking technological system as the cutting tool undergoes wear.

The research resulted in the development of a forecasting method for the cutting tool resource. This method involves identifying parameters of a forecast model based on continuous monitoring of the sound pressure level during the cutting process. Moreover, the model is compiled in such a way that the sought-after resource is included in its mathematical structure, eliminating the need for statistically unreliable criteria parameters when making forecasts about the limit state of the tool.

This article presents a novel model for forecasting the technical state of technological systems, enabling estimation of the resource of both the tool and the technological system as a whole. Knowledge of the system resource facilitates the implementation of adaptive management, preventing unforeseen interruptions for tool replacement or machine repair, and minimizing the risk of workpiece omissions. The developed automated predictive and diagnostic complex facilitates the practical application of the proposed forecasting model across a wide range of material processing scenarios. This advancement addresses a crucial scientific and practical objective of enhancing cutting process efficiency.

Keywords: technological system, control, diagnostics, manufacturing quality, prediction model, tool resource, efficiency of the cutting process.

Вступ

Одна з головних причин зниження точності обробки на металорізальних верстатах – зміна розмірів різального інструменту внаслідок його зношування. Актуальність завдання підвищується при обробці матеріалів, що важко обробляються (корозійно-стійкий жароміцний сплав ХН73МБТЮ), які широко використовуються в авіаційній промисловості та енергетичному машинобудуванні, оскільки для важкооброблюваних матеріалів трудомісткість обробки заготовки можна порівняти з ресурсом інструменту. Зупинка процесу через знос інструменту часто означає брак дорогої деталі. Контроль стану та заміна інструменту в реальних виробничих умовах здійснюється на основі розрахункової стійкості. Але залежно від якості інструменту, варіація стійкості інструменту в одній партії коливається від 15 до 35%. Якщо час роботи інструменту визначається найгіршим зразком у партії, то найбільш стійкі зразки при фіксованому напрацюванні використовують свій ресурс лише на 65%.

Без інформації про інтенсивність зношування інструменту неможлива оптимізація процесів різання (ПР), процедура вибору оптимальних умов обробки тощо.

Незважаючи на тривалі дослідження, що проводяться у зазначеному напрямку проблема створення системи оперативної діагностики стану ріжучого інструменту (PI) залишається невирішеною.

Розвиток засобів діагностики дозволить:

- підвищити точність механообробки за рахунок корекції траєкторії інструменту з урахуванням поточного значення зносу;
- вести оптимальне керування за критерієм зношування інструменту.

Пропоноване дослідження присвячене актуальним питанням підвищення достовірності оцінки розмірного зносу ріжучого інструменту системою моніторингу, розробці методики прогнозування параметрів, що характеризують стан різального інструменту.

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

При різанні робочі поверхні різального інструменту піддаються дії різного роду впливу, а саме фізико-механічного та хімічного, що зменшує ефективність різального інструменту через деформацію, зношення та несправності інструменту. Постійне зношення інструменту сприяє погіршенню його конструктивних параметрів та в загальному зменшує ефективність, внаслідок чого якість і точність механічної обробки знижується, а процент браку лише збільшується, від чого зменшується продуктивність виробництва. Внаслідок чого виробництво стає збитковим та не виправдовує вкладені в нього ресурси та сили [2].

Для того щоб уникнути цих проблем, необхідно використовувати системи діагностики різального інструменту на верстатах з ЧПК, що дасть можливість вчасно змінювати ріжучий інструмент ще до того як він неочікувано вийде з ладу та зіпсує деталь. Система діагностики дозволить проводити контроль стану різального інструменту в режимі реального часу, а також знизить ймовірність неправильної оцінки працездатності різального інструменту і невірних дій системи автоматизованого контролю процесу обробки. А також система діагностики повинна мати можливість використання в умовах автоматизованого виробництва без серйозних конструктивних змін технологічно-оброблювальних систем (ТОС) [3].

Розроблений програмний комплекс, заснований на методах та алгоритмах обробки сигналу та теорії вейвлет-перетворень, дозволить впровадити у виробництво запропоновані методи моніторингу та прогнозу зносу РІ. Підвищити точність та достовірність оцінки зносу різального інструменту шляхом синтезу методів контролю за електричними та віброакустичними сигналами, що підвищить ефективність та надійність усієї технологічної системи верстата. А оцінка ресурсу конкретного РІ в реальному часі дозволить практично реалізувати оптимальне і ситуаційне керування процесом механообробки [8-13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ключовими елементами технологічної системи є різальний інструмент та заготовка – майбутня деталь, заради якої, власне, і створюється металообробна технологічна система. Ці два елементи забезпечують «динамічну замкнутість» технологічної системи та кардинально впливають зміну її динамічної поведінки, оскільки характеристики заготовки та інструменту у процесі функціонування системи безперервно змінюються.

Слід зазначити, що дослідження динамічної поведінки технологічних систем проводяться давно і мають велику бібліографію. Це насамперед роботи, виконані під керівництвом І.С. Амосова, А.І. Бетанелі, Н.А. Дроздова, І.І. Ільницького, А.І. Каширіна, В.В. Камінської, В.А. Кудінова, Л.К. Кучми, Т.М. Лоладзе, Л.С. Мурашкін, В.А. Остаф'єва, М.Ф. Полетика, Д.М. Решетова, А.П. Соколовського, Г.Л. Хаєта, М.Є. Ельясберга, і навіть дослідження зарубіжних учених – J. Chen, J. Black, J. Chen. L.A. Chi, D. Dornfield, S. Choudhury, V. K Jain, Rama Rao Ch та інших [5-9].

Працями таких вчених як, В.О. Румбешта, А.П. Рыбалко, В.Л. Заковоротний, В.Ц. Зориктуєв, В.І. Подураєв, Г.Б. Лурье, О.В. Кретінін, Ю.Г. Кабалдін, А.Д. Макаров, Є.М. Трент та ін., розроблені методи контролю динамічної поведінки технологічних систем на основі супроводжуючих їх роботу різноманітних за фізичною природою інформаційних сигналів: акустичної емісії, вібрації, компонентів сил різання, електричних параметрів та ін [1-4].

Значний внесок у цю проблематику роблять і вітчизняні українські вчені та дослідники: Ю.М. Внуков та В.А. Залога (вплив процесів, які у робочій зоні обробних

систем, з їхньої динаміку); А.П. Зінківський та Г.В. Цибанів (вібраційні та втомні процеси, що супроводжують роботу різноманітних машин та механізмів); В.А. Марцинковський та В.І. Симоновський (динамічна поведінка різноманітного промислового обладнання, у тому числі верстатів з ЧПК та автоматичних ліній) [1, 2].

Однак, незважаючи на значний обсяг подібних робіт, що вивчають різні аспекти динаміки машин, у тому числі й обробних систем, багато теоретичних та практичних проблем оперативного контролю їх динамічної поведінки та визначення на цій основі їх ресурсу, не знайшли ще однозначного рішення.

Так, серйозним обмеженням проведених досліджень є те що, що прийняті методи контролю спрямовані фіксацію поточного стану обробної системи, не враховує передісторію її динамічної поведінки у технологічних умовах її роботи. Отримувані при цьому моделі, що описують поточний стан системи, добре працюють тільки в умовах її роботи, в яких і проводилися вихідні дослідження. В інших умовах доводиться повністю повторювати експеримент, що часто є неприйнятним для широкого практичного використання запропонованого методу визначення ресурсу в практиці виробництва.

Для вирішення завдань визначення ресурсу традиційно використовуються методи контрольних карт, кореляційний, спектральний аналіз та авторегресії. В останні роки багато уваги приділяється нейронним мережам, факторному та кластерному аналізу сигналів, методам, заснованим на використанні нечітких множин [16, 17]. Разом з тим складність реальних процесів роботи обробної системи, їх нелінійність і аварійність призводять до необхідності розробки нових методів та алгоритмів аналізу даних та визначення ресурсу обробних систем.

Тому, незважаючи на значні успіхи в галузі контролю динамічної поведінки обробних систем, залишається проблема підвищення точності, швидкодії, надійності, простоти технічної реалізації та інваріантності до умов їх роботи.

Аналіз сучасного стану методів моніторингу та прогнозу зносу ріжучого інструменту (РІ) дозволив виділити проблеми та шляхи їх вирішення:

1. Більшість систем моніторингу стану інструмента побудовані за таким принципом: вимірюються кілька параметрів процесу різання, що мають кореляційний зв'язок зі зносом інструменту (такі як складові сили різання, вібрація, сигнали акустичної емісії, потужність приводу головного руху). Виміряні сигнали фільтруються, посилюються, отримують корисні характеристики сигналів (амплітуда, спектр, статистичні оцінки, коефіцієнти хвильового спектру), які надходять на вхід нейронної мережі.

2. Більшість існуючих систем моніторингу не задовольняють вимогам універсальності, розраховані на жорстко запрограмовані режими механічної обробки та вузький номенклатурний ряд матеріалів або мають недостатньо високу достовірність. Виявлено проблему створення бази даних та бази знань, а також розробки алгоритмів автоматичного синтезу моделей на основі експериментальних даних.

В результаті виконаного літературно-патентного аналізу вітчизняних та зарубіжних систем моніторингу визначено найбільш надійні та прості методи контролю, що ґрунтуються на аналізі сигналів віброакустичної емісії (BAE) та сигналів електропровідності контакту «інструмент-деталь» (ЕП КІД). Виявлено проблеми, пов'язані з підвищенням чутливості та достовірності методу контролю на основі сигналу BAE та необхідності адаптації моделей ПР, що використовуються для моніторингу та діагностики – для методів контролю на основі ЕП КІД.[5, 6, 12,13]

Висунуто гіпотезу про можливість підвищення швидкодії та точності системи моніторингу шляхом синтезу методів контролю працездатності ріжучого інструменту, що ґрунтуються на вимірі віброакустичної емісії та електропровідності контакту «інструмент-деталь». На першому етапі аналізується сигнал віброакустичної емісії, інваріантний до режимів обробки, і вибирається структура моделі зносу. На другому кроці проводиться

оцінка ступеня зносу РІ з урахуванням аналізу сигналу електропровідності контакту "інструмент-деталь" [12].

Огляд існуючих систем прогнозу зносу РІ показав, що існують два принципово різні підходи до завдання прогнозу:

- ітераційний (прямий) прогноз

$$x_n = f(x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-D}, c), \quad (1)$$

де x – параметр, що спостерігається; c – константа.

- модельні відображення

$$f(t, c) = c_1 \phi_1(t) + \dots + c_p \phi_p(t), \quad (2)$$

де ϕ_1 – базова функція.

У першому випадку (1) процес різання (ПР) розглядається як стаціонарний і не враховує нелінійний характер функціональної залежності зносу інструменту від часу в процесі різання (рисунок 1), характерний для обробки матеріалів, що важко обробляються.

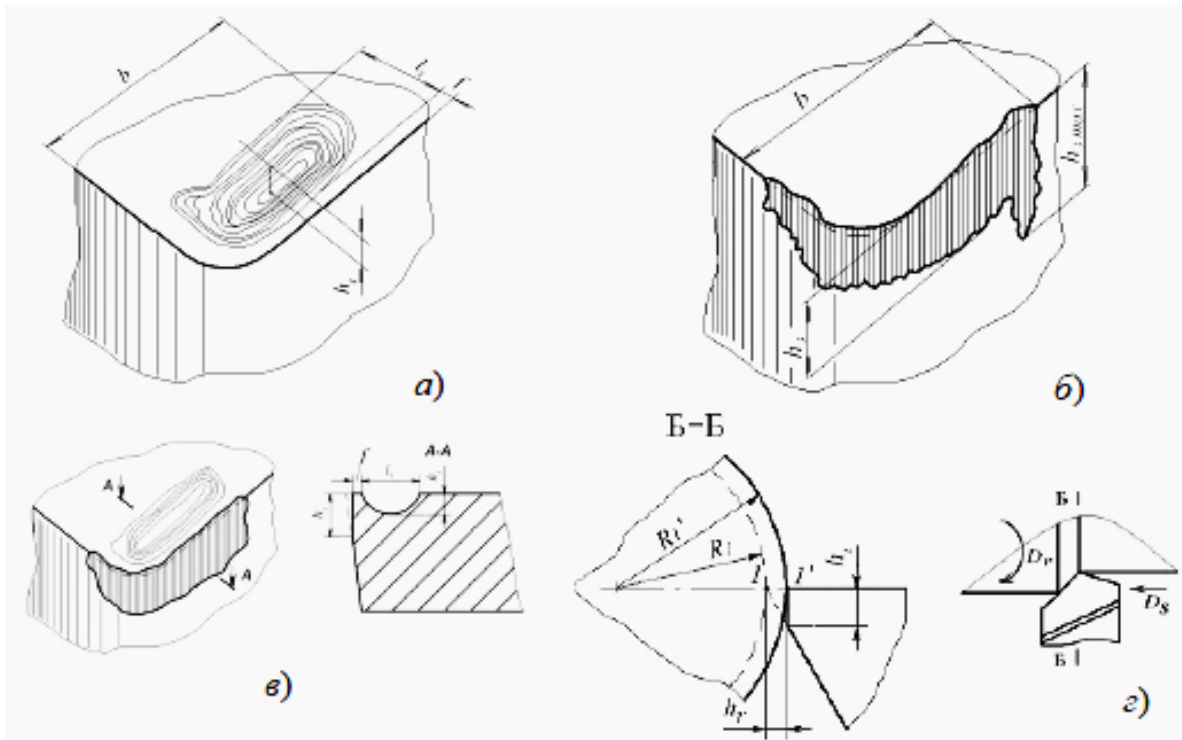


Рис. 1 – Зношування різця по передній (а), задній (б) поверхні;
збалансований знос різця (в); радіальний знос різця (г)

У другому (2) методі, заснованому на використанні раніше отриманої моделі, не враховується змінність факторів зовнішнього середовища та змінність внутрішніх параметрів системи. На підставі проведеного аналізу сформульовані такі вимоги до методу прогнозу стану РІ:

- враховувати апіорну інформацію про модель поведінки об'єкта діагностики через структуру моделі, що зберігається у базі даних;
- кількісну оцінку здійснювати з урахуванням оперативної інформації, отриманої від датчиків.

Метою роботи є вдосконалення методів моніторингу зносу різального інструменту та прогнозу діагностичних параметрів процесу різання.

Виклад основного матеріалу

На основі аналізу об'єкта діагностики, методів контролю стану інструменту та існуючих ефективних виробничих рішень розроблено функціональну схему системи оперативної діагностики стану різального інструменту (рисунок 2). Проведено обґрунтований вибір та реалізація методів контролю на основі електричних та віброакустичних параметрів [12]. Розроблено методики зниження розмірності та отримання інформативних ознак сигналів, реалізовані в програмно-математичному забезпеченні та апробовані в натурних експериментах.

Проаналізовано особливості фізичного формування сигналів термоЕДС, ЕП КІД (рисунок 3) та ВАЕ (рисунок 4), прийняті раніше як основні діагностичні параметри. Відзначено особливості вимірювання термоЕДС для різців з механічним кріпленням ріжучої пластини, для яких запропоновано методику уточненого розрахунку величини термоЕДС, що полягає у компенсації паразитної складової в процесі оперативного вимірювання. Для вибраних методів контролю розрахований динамічний діапазон, швидкодія, точність датчиків та сформульовані вимоги до АЦП. Доопрацьовано пристрій вимірювання ЕП КІД, що відрізняється від аналогів: можливістю одночасної реєстрації термоЕДС, постійною та змінною складовою ЕП КІД; цифровою реєстрацією контрольованих параметрів; високою частотою (до 400 кГц) та точністю ($\pm 0,01$ мВ).

Вимірювання ЕП КІД $G_{КІД}$ (рисунок 3) проводиться за методом, запропонованим у роботах професора Зориктуєва В.Ц., і визначається за такою формулою:

$$G_{КІД} = \frac{1}{R_{КІД}} = \frac{I_E}{U - E} \quad (3)$$

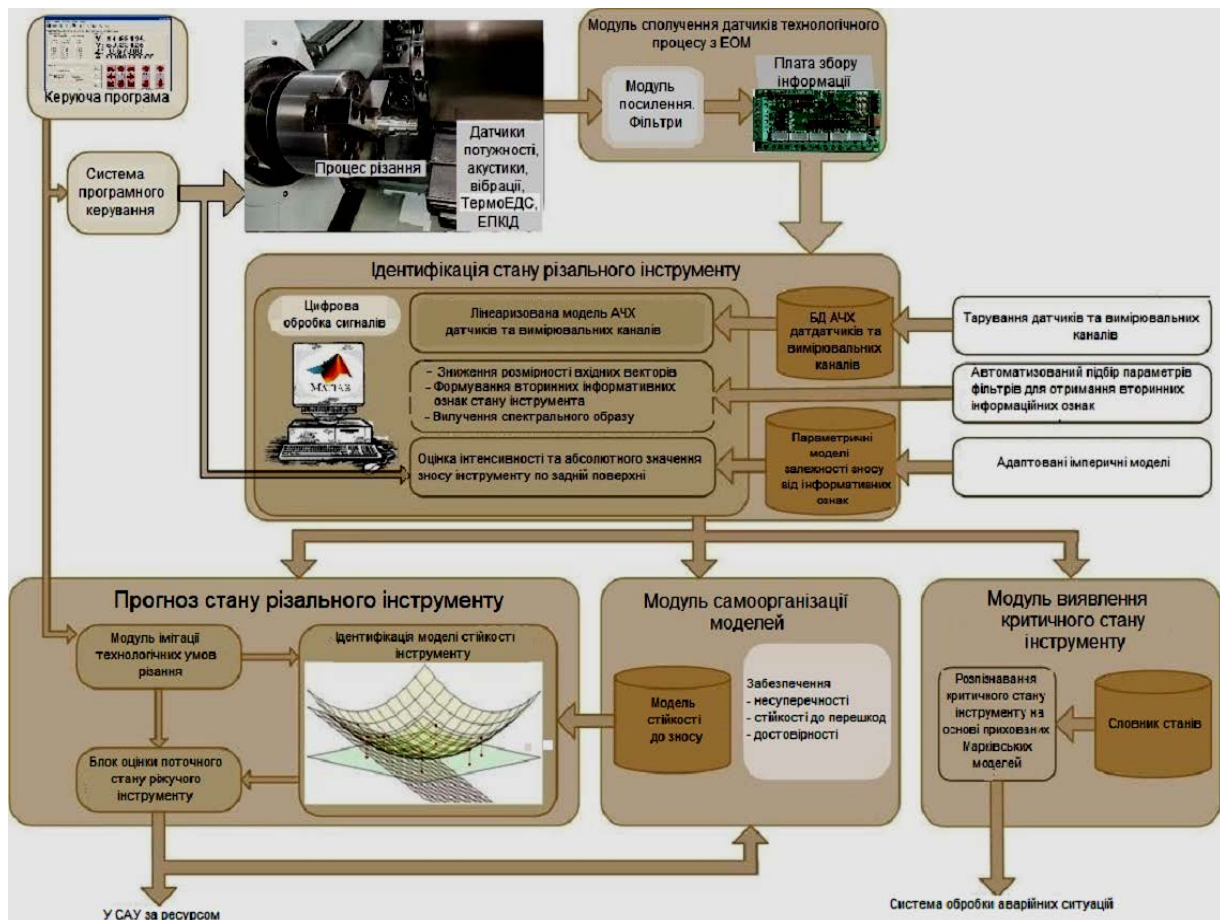


Рис. 2 – Функціональна схема системи оперативної діагностики стану різального інструменту

На контакт "інструмент-деталь" підводиться постійний струм еталонної амплітуди I_E . Після затримки часу τ , обумовленого часом перехідного процесу в ланцюзі СПІД, проводиться вимірювання повної напруги U , яке складається з суми двох складових: напруги індукованого струмом пропусає $I_E R_{КІД}$ і термоЕДС E . Опір контакту залежить від форми контакту, який змінюється в процесі зносу інструменту.

Дослідження методів аналізу сигналу ВАЕ на основі Фур'є та вейвлет-перетворень, теоретично та експериментально доведено ефективність застосування останнього для вирішення проблеми невизначеності частотного та тимчасового вирішення [19, 21, 26]. Запропоновано метод зниження розмірності сигналу на основі вейвлет-перетворень без зниження його інформативності, що полягає в оцінці середньої енергії E_j значень вейвлет-коефіцієнтів деталізації j -го рівня (4):

$$E_j = \frac{1}{T_j} \sum_{k=1}^{T_j} d_j^2(k), \quad (4)$$

де T_j – число коефіцієнтів у кожній шкалі по-різному, оскільки часові інтервали хвилових коефіцієнтів змінюються пропорційно j ; j – рівень розкладання; d_j - коефіцієнт деталізації j -рівня вейвлет-розкладання:

$$d_{j-1,k} = (f, \psi_{j-1,k}) = \int_R f(x) \psi_{j-1,k}(x) dx \quad (5)$$

де $\psi(x)$ - аналізуючий вейвлет.

Встановлено, що інформативним параметром, що характеризує знос РІ є дисперсія деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладання сигналу ВАЕ (рисунок 5, а), даний параметр є нечутливим до змін режимів обробки. Для вейвлет-аналізу ефективно застосування найпростішого базису – вейвлет Хаара. Мінімальна тривалість аналізованої вибірки становить 0,1 с. Ідентифікація зношування РІ здійснюється за значенням енергії деталізуючих коефіцієнтів j -го порядку. Для розкладання у базисі вейвлета Хаара $3 < j < 6$.

Енергетичний спектр апроксимуючих коефіцієнтів є чутливим до поломок та переривань ПР (рисунок 5, б).

Встановлено, що для розпізнавання нейронною мережею LVQ (learning vector quantization) двох станів інструменту, що відповідають гострому ($h_3 < 0,2$ мм) та зношеному ($h_3 > 0,4$ мм), достатньо навчання на мінімальному обсязі експериментальних даних (один тестовий прохід).

Результат розпізнавання інваріантний для зміни режимів обробки в широких межах.

Для розпізнавання стану інструмента з точністю $\pm 0,1$ мм потрібно більший обсяг експериментальних даних, підвищення потужності мережі та введення додаткових вхідних координат, що відповідають режимам обробки. Однак у цьому випадку достовірність результату розпізнавання з урахуванням архітектури досягає 75%. Причина невисокої ефективності НС при розпізнаванні зносу РІ з високою точністю полягає в тому, що різні стани РІ здатні породжувати один і той же миттєвий енергетичний вейвлет-спектр віброакустичних коливань.

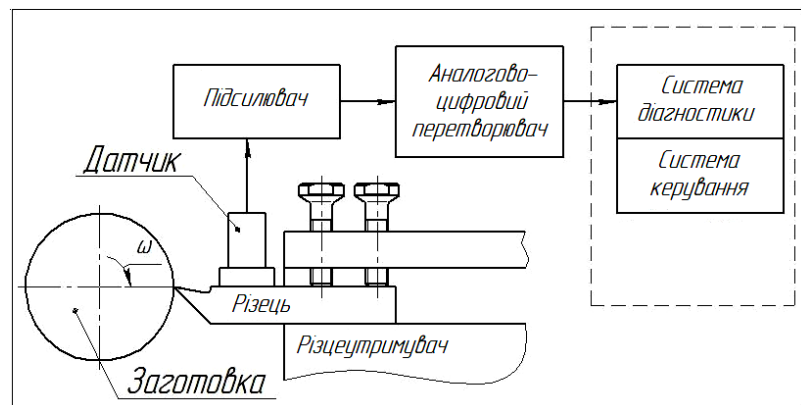


Рис. 4 – Схема виміру сигналу віброакустичної емісії

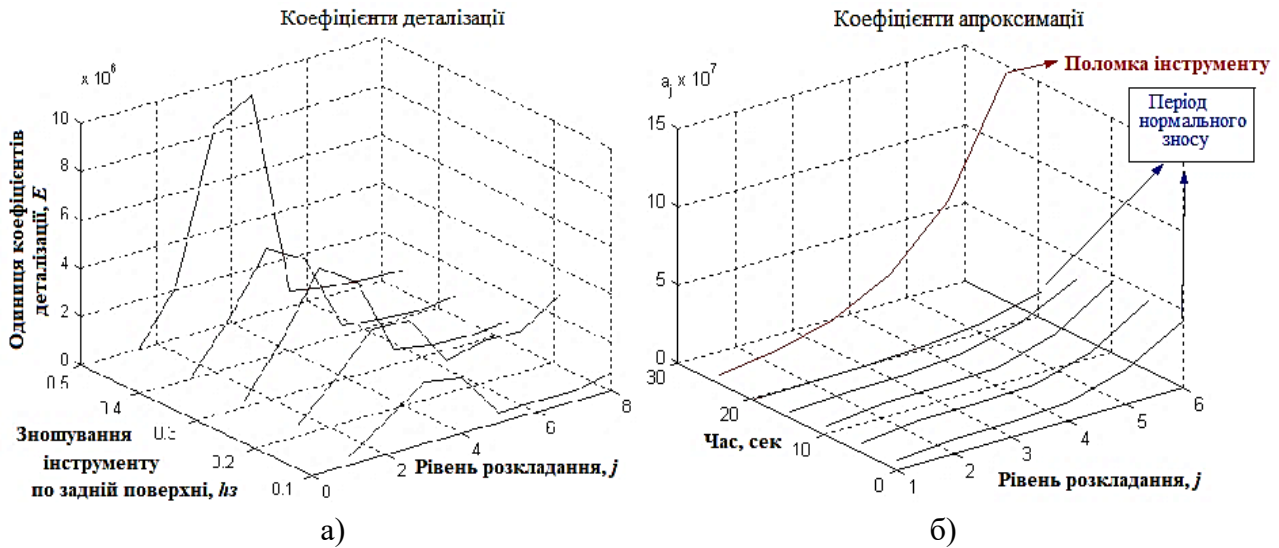


Рис. 5 – Коефіцієнти розкладання сигналу ВАЕ в базисі вейвлета Хаара, отримані при поздовжньому точенні ВК8 ($V = 40$ м/хв; $s = 0,075$ м/об; $t = 0,5$ мм):
а – деталізуючі; б – апроксимуючі

З метою підвищення точності та достовірності оцінки стану РІ розроблено та отримав експериментальне підтвердження (рисунок 6) алгоритм ідентифікації моделі зносу РІ, що полягає у знаходженні точки завершення процесу приробітку РІ за сигналом ЕП КІД, та зносу інструменту $h_{кр}$ за сигналом ВАЕ НС на пробному проході з наступним розрахунком рівняння лінійної функції $h_3 = f(G^*_{SN})$. Відносна електропровідність G^* має практично

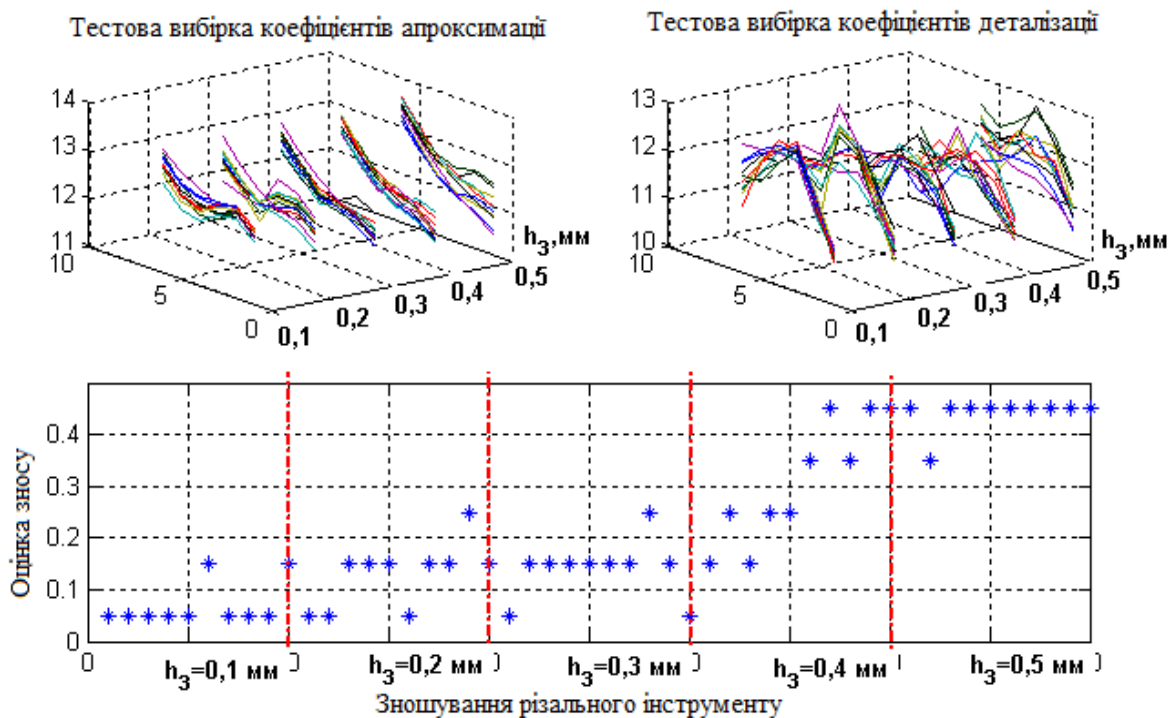


Рис. 6 – Результат розпізнавання стану РІ при обробці ВК6ОМ, НС при $V = 37 \div 48$ м/хв, $dV/dt > 0$, $s = 0,9$ мм/об навчену при $V = 25 \div 41$ м/хв, $dV/dt > 0$, $s = 0,125$; $V = 37 \div 48$ м/хв, $dV/dt < 0$, $s = 0,125$ мм/об

лінійну залежність від зносу інструменту і практично інваріантна до величини термоЕДС, швидкості та глибини різання.

$$G_{Si}^* = \frac{G_{S\delta}}{G_{Si}}, \quad (6)$$

де G_{Si}^* - відносна електропровідність, визначається з наступного відношення; $G_{S\delta}$ - електропровідність КІД при робочій подачі; G_{Si} -ЕП КІД при зниженій подачі $s_n = 0,07$ мм/об.

Алгоритм оцінки зносу на основі отриманої моделі забезпечив точність розпізнавання 0,05 мм на ділянці нормального зносу РІ та відрізняється від аналогів здатністю до адаптації та самонавчання в процесі механообробки.

Для зберігання аналізу існуючих та новостворених моделей, на основі яких виконується ідентифікація поточного стану РІ та прогноз працездатності та діагностичних параметрів процесу різання, використовується база даних (БД) та база знань (БЗ). Структура бази даних відповідає вимогам ієрархічності і передбачає такі поля:

- марку оброблюваного матеріалу та інструменту;
- вихідний параметр (E - термоЕДС; G - ЕП КІД);
- вхідні (варіюються) параметри, що кодуються символами $x_1, x_2 \dots x_n$, та інтервали їх варіювання ($x_1 \rightarrow V(30-50$ м/хв) швидкість різання; $x_2 \rightarrow S(0,097-0,39$ мм/об) - подача інструменту; $x_3 \rightarrow t(0,5-1,5$ мм) - глибина різання; $x_4 \rightarrow h_3(0,1-0,4$ мм) - зношування інструменту по задній поверхні;
- постійні відомі параметри, що не змінюються або змінюються незначно у процесі обробки з присвоєними їм значеннями (кут у плані, передній, задній кут);
- вид обробки, характеристики інструменту (різець цільний, з напайними пластинами, з механічним кріпленням ріжучої пластини), тип устаткування, що використовується, особливості обробки (ЗОТС, без ЗОТС).

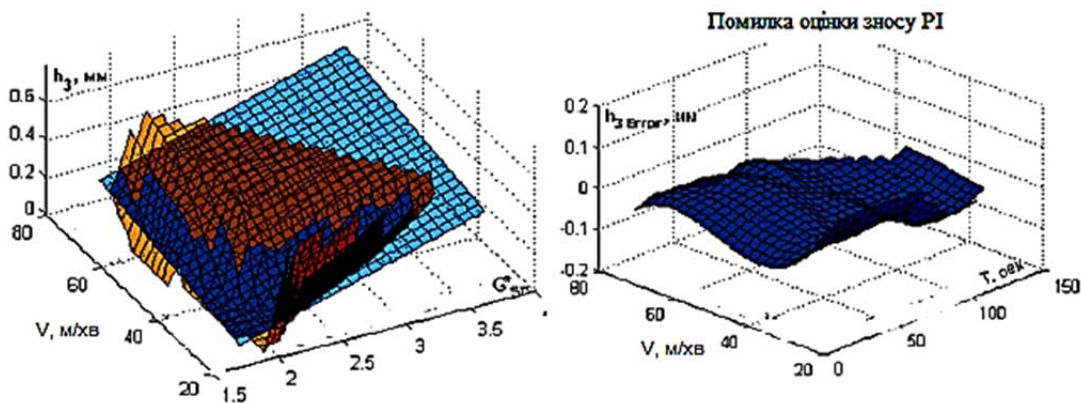


Рис. 7 – Експериментальна та розрахункова поверхні функції $h_3 = f(V, G_{Si}^*)$ та функція помилки $\Delta = f(V, T)$ для для оброблюваного матеріалу ХН73МБТЮ інструментом з ВК8

Відмінна особливість БД полягає у векторно-матричному представленні параметрів. Таким чином, як вихідний параметр може бути використаний вектор стану (наприклад $[cD_1, \dots, cD_6, cA_1, \dots, cA_6]$ – деталізуючих та апроксимуючих коефіцієнтів вейвлет-розкладання (див. табл.1)).

Наприклад, якщо знайдено параметричну залежність термоЕДС E від швидкості різання V , подачі інструменту S , глибини різання t і зносу інструменту по задній поверхні h_3 і, знайдена закономірна залежність, що однозначно зв'язує температуру з термоЕДС, то формується функціональна залежність, що зв'язує температуру РІ зі швидкістю, глибиною та зносом РІ.

Таблиця 1 – Приклад процедурних знань збережених у основі правил

1	$E = f(V, S, t, h_3)$	&	$Q = f(E)$	→	$Q = f(V, S, t, h_3)$
2	$E = f(V, S, t, h_3)$	&	$E = f(Q)$	→	$E = f(V, S, t, h_3)$
3	$G = f(V, S, t, L)$	&	$hz = f(L)$	→	$G = f(V, S, t, h_3)$
	...				

Статистичний аналіз результатів експерименту показав (рис. 8), що для найгіршого випадку, коли модель зносу РІ відсутня, точність прогнозу ресурсу, що залишився, після завершення процесу приробітку підвищується з 66% (1,3 мм) (за статистичними моделями) до 89 % (0,6 мм); точність прогнозу настання критичного зносу РІ з 74% (65 сек) до 88% (11 сек). Якщо прецедент поєднання технологічних параметрів для цієї пари матеріалу та інструменту є в базі даних, точність прогнозу зростає.

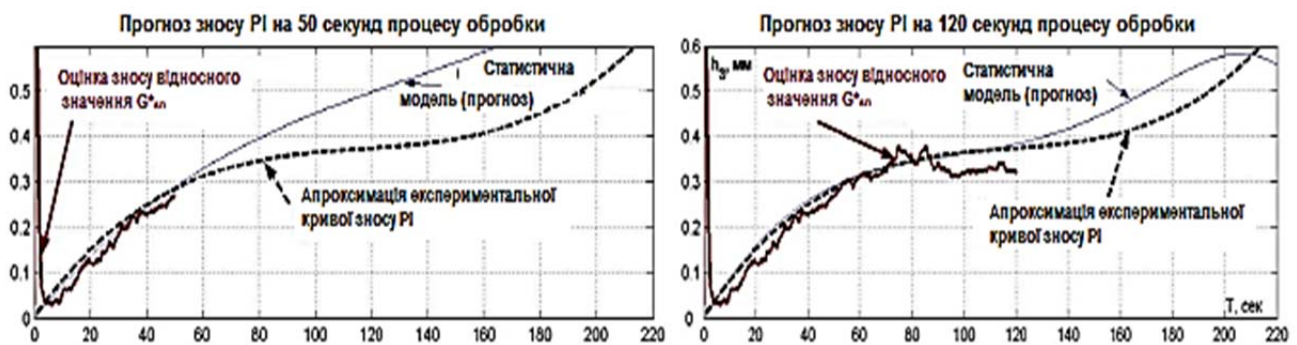


Рис. 8 – Прогноз зносу РІ

Висновки

У роботі на прикладі технологічної металообробної системи вирішено важливе науково-технічне завдання визначення фактичного ресурсу механічної системи за результатами оперативного контролю тренду інформаційного сигналу, що супроводжує її роботу та відображає індивідуальні особливості динамічної поведінки системи протягом контрольованого терміну її експлуатації та наступної параметричної ідентифікації на основі цієї інформації прогнозової моделі, числові значення одних з коефіцієнтів якої дорівнюють напрацюванню даної системи до її відмови.

1. Удосконалено методику ідентифікації зносу РІ за сигналом віброакустичної емісії шляхом оцінки енергії спектра деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення. Удосконалення методики підвищило інваріантність оцінки зносу до режимів механообробки.

2. Розроблено методику корекції моделі зносу РІ щодо відносної електропровідності контакту «інструмент-деталь». У ідентифікації моменту настання катастрофічного зносу РІ по енергетичному спектру деталізуючих коефіцієнтів вейвлет-перетворення сигналу ВАЕ, лінійної інтерполяції функції $h_3(t)$ в зоні нормального зносу та корекції моделі на основі даної інформації. Синтез методів контролю на основі електричних та віброакустичних сигналів дозволив підвищити точність та забезпечити універсальність оцінки поточного зносу РІ.

3. Розроблено алгоритм прогнозування діагностичних параметрів процесу різання та зносу РІ, на основі наявних апріорних та емпіричних даних, який враховує нелінійність функції зносу РІ у часі та варіацію стійкості інструментів у партії. Алгоритм полягає в корекції оцінки базової моделі, за результатами поточних вимірювань, шляхом додавання адитивної складової отриманої на основі екстраполяції функції нев'язки, що дозволяє знизити витрати на інструментальний матеріал; провести оцінку ресурсу інструменту, що залишився, перед початком обробки нової заготовки; ввести оптимальне керування станом різального інструменту.

Список використаних джерел:

1. Залога В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник / В. О. Залога, Ю. М. Внуков. – Суми : Сумський державний університет, 2010. – 243 с.
2. Залога В. А. Дослідження можливості застосування методу діагностики акустичної емісії в чистове точіння титанового сплаву / В. А. Залога, Р. Н. Зінченко // *Вісник КумДУ. Серія Технічні науки*. – 2008. – № 4. – С. 118-125.
3. Румбешта В. О. Системи керування якістю виготовлення виробів : курс лекцій / В. О. Румбешта. – НТУУ «КПІ», 2000. – 85 с.
4. Рыбалко А. П. Системы технологической диагностики и адаптивного управления для станков с ЧПУ / А. П. Рыбалко, Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин. // *Високі технології в машинобудуванні*. – 2015. – № 1. – С. 150–161.
5. Barton J. Tool - wear monitoring by optical techniques / J. Barton, B. Reuben // *Materials World*. – 1996. – № 4 (3). – P. 131–132.
6. Chen J. C. A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations / J. C. Chen, J. T. Black // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1997. – Iss. 37 (6). – P. 783–800.
7. Chen J. C. A tool breakage Detection system using an Accelerometer sensor / J. C. Chen, W. L. Chen // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 1999. – № 10. – P. 187-197.
8. Chi L. A. A self-organizing approach to the detection and prediction of tool wear / L. A. Chi, D. A. Dornfield // *ISA Transactions*. – 1998. – № 37. – P. 239-255.
9. Choudhury S. K. On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network / Choudhury S. K., Jain V. K., Rama Rao Ch. V. V. // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1999. – № 39. – P. 489-504.
10. Dimla D. E. Application of perceptron neural networks to tool state classification in a metal-turning operation / D. E. Dimla // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 1999. – № 12. – P. 471-477.
11. Govekar E. Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes / Govekar E., Gradisek J., Grabec I. // *Ultrasonics*. – 2000. – № 38. – P. 598-603.
12. Huang P. T. Fuzzy logic-base tool breakage detecting system in end milling operations / Huang P. T., Chen J. C. // *Computers and Industrial Engineering*. – 1998. – № 35 (1-2). – P. 37-40.
13. Li X. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning / X. Li // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2002. – № 42. – P. 157-165.
14. Li X. Current-sensor-based feed cutting force intelligent estimation and tool wear conditioning monitoring / Li X., Djordjevic A., Venuvinod P. K. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2000. – Iss. 47(3). – Pp. 697-702.
15. Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry / McBride R., Carolan T. A., Barton J. S., Wilcox S. J., Borthwick W. K. D., Jones J. D. C. // *Measurement Science and Technology*. – 1993. – Iss. 4(10). – P. 1122-1128.
16. Owsley L. M. Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring / Owsley L. M., Atlas L. E., Bernard G. D. // *IEEE Transactions on Signals Processing*. – 1997. – № 45 (11). – P. 2787-2798.
17. Atlas L. Hidden Markov Models for Machining Tool-Wear / Atlas L., Ostendorf M., Bernard G. D. // *IEEE*. – 2000. – P. 3887-3890.
18. Quan Y. On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural-network fusion / Quan Y., Zhou M., Luo Z. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 1998. – Iss. 11. – P. 717-722.
19. Saglam H. Tool Condition Monitoring in Milling based on Cutting Forces by a Neural Network / H. Saglam, A. Unuvar // *International Journal of Production Research*. – 2003. № 41 (7). – P. 1519-1532.
20. Sick B. Fusion of hard and soft computing techniques in indirect, online tool wear monitoring / B. Sick // *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*. – 2002. – № 32 (2). – P. 80-91.
21. Dey S. A Bayesian Network Approach to Root Cause Diagnosis of Process Variations / S. Dey, J. A. Stori // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – Iss. 45. – P. 75-91.
22. Haber R. E. Intelligent Process Supervision for Predicting Tool Wear in Machining Processes / R. E. Haber, A. Alique // *Mechatronics*. – 2003/ – Iss. 13. – P. 825–849.
23. Young H. T. Cutting temperature responses to flank wear / H. T. Young // *Wear*. 1996. – T. 201. – P. 117–120.
24. Tool-wear Monitoring based on Continuous Hidden Markov Models / Vallejo A. J., Nolasco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A. // *LNCS*. – 2005. – no 3773. – P. 880–890.
25. Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center / Vallejo A. J., Nolasco-Flores J. A., Morales-Menéndez R., Sucar L. E., Rodríguez C. A. // *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. – 2006. – P. 7097–7101.
26. Pattern Recognition Approaches for Diagnosis of Cutting Tool Wear Condition / Vallejo A. J., Morales-Menéndez R., Garza-Castañón L. E., Alique J. R. // *Transactions of the North American Manufacturing of Research Institution of SME*. – 2007. – T. 35. – P. 81–88.
27. Advance in Swarm and Computational Intelligence / Tan Y. et al // 6th International Conference, ICSI. – 2015. – Part 3. – P. 115–126.

References

1. Zaloga, VO & Vnukov, JM 2010, *Znoshuvannja i stijkist' rizar'nih lezovih instrumentiv, [Wear resistance and cutting blade tools]*, Sums'kij derzhavnij universitet, Sumi.

2. Zaloha, VA & Zinchenko, RN 2008, 'Doslidzhennia mozhyvosti zastosuvannia metodu diahnostryky akustychnoi emisii v chystove tochninnia tytanovoho splavu', [*Investigation of the possibility to apply the method of acoustic emission diagnostics in titanium alloy finishing turning*], *Vesnyk KumDU. Seriya Tekhnichni nauky*, no 4, Pp. 118-125.
3. Rumbeshta, VO 2000, *Systemy keruvannia yakistiu vyhotovlennia vyrobiv*, [*Quality management systems for manufacturing products: a course of lectures*], NTUU «KPI», Kiev.
4. Ribalko, AP, Lyshchenko, NV & Larshyn, VP 2015, 'Cystemi tekhnolohycheskoi dyahnostryky y adaptivnoho upravleniya dlia stankov s ChPU', [*Process diagnostics and adaptive control systems for CNC machines*], *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 1, Pp. 150-161.
5. Barton, J & Reuben, B 1996, 'Tool - wear monitoring by optical techniques', *Materials World*, no 4 (3), Pp. 131-132.
6. Chen, JC & Black, JT 1997, 'A fuzzy-nets in-process (FNIP) system for tool-breakage monitoring in end-milling operations', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 37, Pp. 783-800.
7. Chen, JC, Chen, WL 1999, 'A tool breakage Detection system using an Accelerometer sensor', *Journal of Intelligent Manufacturing*, no 10, Pp. 187-197.
8. Chi, LA & Dornfield, DA 1998, 'A self-organizing approach to the detection and prediction of tool wear', *ISA Transactions*, no 37, Pp. 239-255.
9. Choudhury, SK, Jain, VK & Rama Rao ChVV 1999, 'On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 39, Pp. 489-504.
10. Dimla, DE 1999, 'Application of perceptron neural networks to tool state classification in a metal-turning operation', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, no 12, Pp. 471-477.
11. Govekar, E, Gradisek, J & Grabec, I 2000, 'Analysis of acoustic emission signals and monitoring of machining processes', *Ultrasonics*, no 38, Pp. 598-603.
12. Huang, PT & Chen, JC 1998 'Fuzzy logic-base tool breakage detecting system in end milling operations', *Computers and Industrial Engineering*, no 35, Pp. 37-40.
13. Li, X 2002, 'A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, no 42, Pp. 157-165.
14. Li, X, Djordjevich, A & Venuvinod, PK 2000, 'Current-sensor-based feed cutting force intelligent estimation and tool wear conditioning monitoring', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, no 47(3), Pp. 697-702.
15. McBride, R, Carolan, TA, Barton, JS., Wilcox, SJ, Borthwick, WKD & Jones, JDC 1993, 'Detection of acoustic emission in cutting processes by fibre optic interferometry', *Measurement Science and Technology*, no 4(10), Pp. 1122-1128.
16. Owsley, LM., Atlas, LE & Bernard, GD 1997, 'Self-Organizing Feature Maps and Hidden Markov Models for Machine-Tool Monitoring', *IEEE Transactions on Signals Processing*, no 45 (11), P. 2787-2798.
17. Atlas, L, Ostendorf, M & Bernard, GD 2000, 'Hidden Markov Models for Machining Tool-Wear', *IEEE*, Pp. 3887-3890.
18. Quan, Y, Zhou, M & Luo, Z 1998, 'On-line robust identification of tool-wear via multi-sensor neural-network fusion', *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, no 11, Pp. 717-722.
19. Saglam, H & Unuvar, A 2003, 'Tool Condition Monitoring in Milling based on Cutting Forces by a Neural Network', *International Journal of Production Research*, no 41, Pp. 1519-1532.
20. Sick, B 2002, 'Fusion of hard and soft computing techniques in indirect, online tool wear monitoring', *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*, no 32 (2), Pp. 80-91.
21. Dey, S & Stori, JA 2004, 'A Bayesian Network Approach to Root Cause Diagnosis of Process Variations', *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no 45, Pp. 75-91.
22. Haber, RE 2003, 'Alique A. Intelligent Process Supervision for Predicting Tool Wear in Machining Processes', *Mechatronics*, no 13, Pp. 825-849.
23. Young, HT 1996, 'Cutting temperature responses to flank wear', *Wear*, T. 201, Pp. 117-120.
24. Vallejo, AJ, Nolasco-Flores, JA, Morales-Menéndez, R, Sucar, LE & Rodríguez, CA 2005, 'Tool-wear Monitoring based on Continuous Hidden Markov Models', *LNCS*, T. 3773, Pp. 880-890.
25. Vallejo, AJ, Nolasco-Flores, JA, Morales-Menéndez, R, Sucar, LE & Rodríguez, CA 2006, 'Diagnosis of a Cutting Tool in a Machining Center', *IEEE International Joint Conference on Neural Networks*, Pp. 7097-7101.
26. Vallejo, AJ, Morales-Menéndez, R, Garza-Castañón, LE & Alique, JR 2007, 'Pattern Recognition Approaches for Diagnosis of Cutting Tool Wear Condition', *Transactions of the North American Manufacturing of Research Institution of SME*, no 35, Pp. 81-88.
27. Tan, Y. et al 2015, 'Advance in Swarm and Computational Intelligence', *6th International Conference, ICSI 2015*, Part 3, Pp. 115-126.

Стаття надійшла до редакції 07 червня 2023 року

DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-33-41

УДК 681.515:621.314

АЛГОРИТМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

© Артюх С.М., Князева В.М., Антоненко Н.С., Грінченко Г.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Артюх Світлана Миколаївна (Artiukh Svitlana): [ORCID: 0000-0003-0804-6313](https://orcid.org/0000-0003-0804-6313); email: artyh@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.

Князева Вікторія Миколаївна (Knazieva Viktoriia): [ORCID:0000-0002-3106-4897](https://orcid.org/0000-0002-3106-4897); email: vitek911@ukr.net, кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна

Антоненко Наталія Сергіївна (Antonenko Nataliia): [ORCID:0000-0001-5576-3388](https://orcid.org/0000-0001-5576-3388); e-mail: nsantonenko2015@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): [ORCID: 0000-0002-6498-6142](https://orcid.org/0000-0002-6498-6142); e-mail: hrrinchenko@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.

В статті розглянуто можливість розроблення алгоритмів адаптації систем регулювання параметрів технологічної установки на основі нейро-мережевого підходу та проектування даної системи регулювання на основі сучасних засобів автоматичного управління. Розробка алгоритмів та програмно-апаратних засобів автоматичного регулювання енергетичними установками у реальному часі виконувалась на основі реалізації наступних задач: розробки структури автоматичної системи та структури системи регулювання; здійснення програмно-апаратної реалізації системи регулювання, а саме реалізації структури програмного забезпечення та програмної реалізації пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора. Реалізовано систему адаптивного навчання нейронної мережі.

Для розв'язання поставлених задач використовувались методи: нейро-мережевого підходу до вирішення проблем пошуку оптимальних параметрів регулятора технологічного процесу в енергетичних установках; об'єктно-орієнтованого програмування для реалізації системи управління. Для пошуку параметрів пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора пропонується застосувати нейро-мережевий підхід, під час якого нейронна мережа вбудовується в систему регулювання. Пропорційно-інтегрально-диференціального регулятор має найбільш широкі можливості по доданню системі регулювання необхідних властивостей. Він застосовується в тих випадках, коли необхідно отримати якісну систему автоматичного регулювання без великих витрат на проведення досліджень по синтезу більш складного закону регулювання.

Спираючись на результати досліджень проведено аналіз технологічного процесу, що протікає в паровому котлі, узагальнення алгоритмів управління параметрами, підбір апарату штучних нейронних мереж для розрахунку коефіцієнтів пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора.

Ключові слова: алгоритм, штучні нейронні мережі, нейрон, система регулювання, програмна система.

Artiukh S., Kniazieva V., Antonenko N., Hrinchenko H. Algorithms for the Adjustment of Technological Process Parameters in Power Installations.

The article considers the possibility of developing algorithms for adapting the control systems of technological plant parameters based on a neural network approach and designing this control system on the basis of modern automatic control means. The development of algorithms and software and hardware for real-time automatic control of power plants was carried out on the basis of the following tasks: development of the structure of the automatic system and the structure of the control system; implementation of the software and hardware implementation of the control system, namely the implementation of the software structure and the software implementation of the proportional-integral-differential controller. The system of adaptive training of the neural network was implemented.

To solve the tasks, the following methods were used: a neural network approach to solving problems of finding the optimal parameters of a process controller in power plants; object-oriented programming for the implementation of a control system. To search for the parameters of a proportional-integral-differential controller, it is proposed to apply a neural network approach, in which a neural network is embedded in the control system. The proportional-integral-differential controller has the widest possibilities for imparting the necessary properties to the control system. It is used in cases where it is necessary to obtain a high-quality automatic control system without high costs for research on the synthesis of a more complex control law.

Based on the research results, we analyze the technological process taking place in a steam boiler, generalize the algorithms for controlling parameters, and select an artificial neural network apparatus for calculating the coefficients of a proportional-integral-differential controller.

Keywords: algorithm, artificial neural networks, neuron, control system, software system.

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

Сучасний етап розвитку людської цивілізації передбачає застосування різних видів енергії. Основну роль у цьому відіграє енергетична галузь[1-3]. В основному її завданням на сучасному етапі є перетворення одних видів енергії у інші. Потреба в перетворенні виникла через необхідність використання конкретних видів енергії (в основному тепла та електроенергії) в технологічних процесах, водночас за достатньо широкої різноманітності початкових енергоресурсів. Різні види форм енергії та властивість їх перетворення надають можливість застосовування у відповідності до потреб промисловості і населення. При цьому основними початковими джерелами були і залишаються осередки викопного палива (природний газ, нафта, вугілля, горючі сланці та ін.). Трансформація енергії зазвичай проходить у різних системах. Сьогодні енергетикою застосовуються основні п'ять видів установок: генеруючі, акумулюючі, перетворюючі, транспортуючі та споживаючі [4].

Постійне удосконалення установок триває вже понад 100 років. Енергетична ефективність використання конкретних видів енергоресурсів, рівень досконалості енергетичних установок визначається коефіцієнтом корисної дії (ККД) установки. Технологія окислення (спалювання палива) передбачає забезпечення подачі палива та окислювача в чітко визначених пропорціях для найбільш ефективного його спалювання і отримання тепла. Такі установки характеризуються умовною неперервністю процесів, які в них протікають [5]. Саме тому розробка алгоритму пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора і моделі нейро-мережевого регулювання параметрів автоматичної системи дозволить здійснювати регулювання енергетичними установками у реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями розвитку та впровадження засобів автоматизації, в яких використовуються штучні нейронні мережі розглядаються в багатьох вітчизняних та

закордонних авторів [6-11]. Так, наприклад, в роботах [8-11, 13-15] розглянуто приклади ефективного використання апаратних рішень з програмними версіями штучних нейронів та інших компонентів, які дозволяють розширити функціональні властивості засобів автоматизації, знизивши при цьому вимоги до використовуваних обчислювальних засобів. На прикладі інтелектуальної технічної діагностики електродвигунів відзначено можливість оцінки технічного стану складних електромеханічних систем. Розроблено алгоритми обчислень і логічних циклів, придатних для синтезу теплового діагностичного експерта зі штучною нейронною мережею, здатного ідентифікувати очікувані несправності в електромеханічному обладнанні будь-якої складності. Використання експериментальних даних в електронних компонентах дозволило отримати калібрувальну характеристику для її подальшого використання при оцінці тенденції розвитку можливих нестандартизованих теплових подій, які з'являються при активації несправностей в окремих частинах працюючого обладнання та наведено прикладні рішення та наочні приклади експериментального та імітаційного моделювання розроблених компонентів теплового діагностичного експерта зі штучною нейронною мережею.

Сучасні системи проектування і розробки автоматизованих систем будуються на основі стандарту IEC 61131 – це стандарт що описує мови програмування для програмованих логічних контролерів. На даний момент є актуальною редакція IEC 6113-3 [12]. В перше цей стандарт було опубліковано міжнародною електротехнічною комісією у грудні 1993 року з метою вирішення проблем уніфікації устаткування для промислової автоматизації. Цей стандарт охоплює вимоги до апаратних засобів, їх монтажу, тестування, налагодження, програмування.

Стандарт містить у собі п'ять мов програмування з котрих перші дві текстові три інші графічні:

- ST – (англ. Structured Text) структурований текст;
- IL – (англ. Instruction List) список інструкцій;
- LD – (англ. Ladder Diagram) сходинова діаграма;
- FBD – (англ. Function Block Diagram) діаграма функціональних блоків;
- SFC – (англ. Sequential Function Chart) послідовний ряд блоків.

Системи автоматичного регулювання відіграють не аби яку роль у ході цього процесу, що дозволяє мінімізувати затрати, підвищити ефективність, здійснювати легкий контроль за об'єктом управління у ході виконання технологічного процесу [13-15].

Методи дослідження

Для даного дослідження при розробці алгоритмів автоматичного регулювання технологічного процесу в енергетичних установках використовувався диференційний аналіз об'єкту управління та застосовувались методи нейро-мережевого підходу для вирішення проблем пошуку оптимальних параметрів регулятора технологічного процесу в енергетичних установках.

Метою роботи є розроблення алгоритмів та програмно-апаратних засобів автоматичного регулювання енергетичними установками у реальному часі.

Виклад основного матеріалу

Система CoDeSys була розроблена компанією 3S-Smart Software Solutions GmbH (Kempten, Germany), як система програмного комплексу для промислової автоматизації. В CoDeSys реалізовано відхилення від стандарту IEC 61131-3:2013, що дає змогу реалізовувати об'єктно-орієнтований підхід до програмування ООП.

Редактор має селектор платформи що дозволяє обрати платформу для програмування у нашому випадку це буде контролер OWEN PLC160M.

Після обирання платформи надається можливість вибору першої програми PLC_PRG, у нашому випадку ми будемо застосовувати диспетчер задач для циклічного виконання підпрограм Task manager по перериванню.

У програму можна додавати інші підпрограми для виконання, структура редактора програм складається з блоку декларування змінних і блоку редактора програм.

Програми, що пишуться у редакторі, компілюються і завантажуються в програмований логічний контролер де вони виконуються по заданому раніше алгоритму. Контролер це блок, що виконує усі логічні операції. Він оснащений портами вводу виводу цифрових та аналогових сигналів а також інтерфейсами для взаємодії із «зовнішнім світом».

Окрім програми для програмування контролера будемо застосовувати ще програму для програмування панелі оператора Weintek EasyBuilder Pro. Панель оператора у свою чергу реалізовує людино-машинний інтерфейс і допомагає оператору взаємодіяти з автоматизованим комплексом, змінювати параметри, режими роботи тощо. EasyBuilder Pro. Це середовище візуального програмування графічного інтерфейсу панелі оператора.

Роботу по побудові нейро-мережі будемо виконувати у середовищі Matlab після чого передаємо її у редактор динамічного моделювання Matlab Simulink. Вікно пакету зображено на рис. 1.

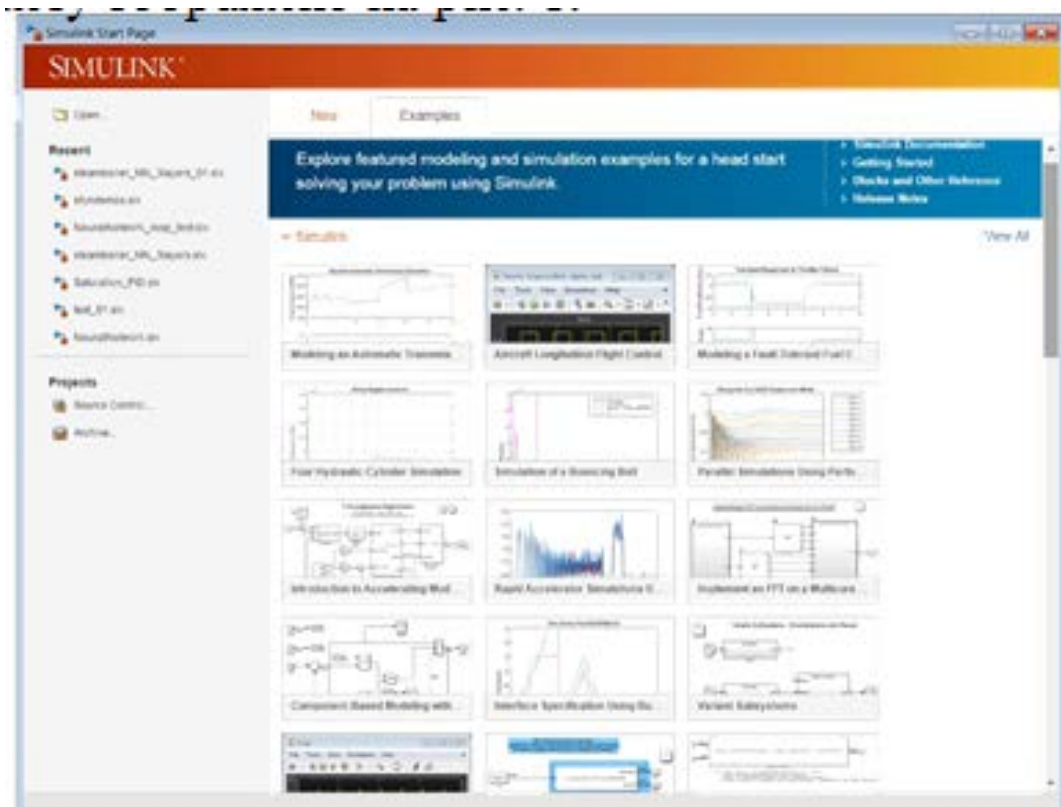
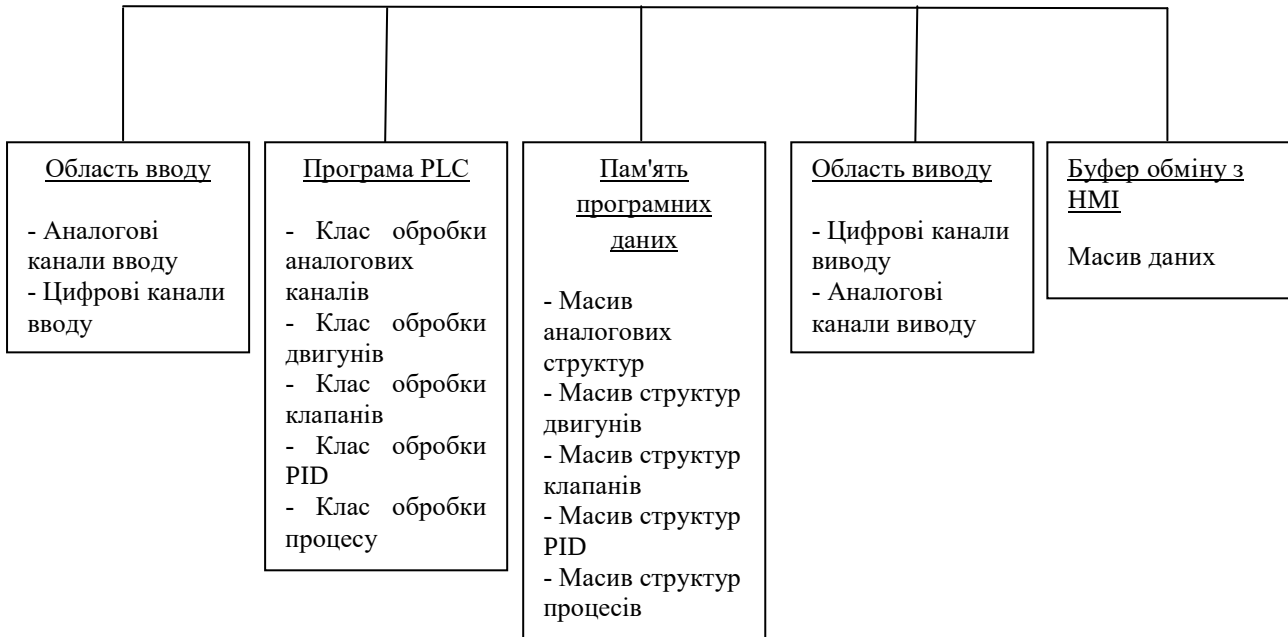


Рис.1 – Вікно редактора Matlab Simulink

Редактор дозволяє застосовувати на практиці готові бібліотеки блоків для моделювання електросилових, механічних і гідравлічних систем, а також застосовувати на практиці об'єктно-орієнтований підхід при розробці систем управління, засобів цифрового регулювання і пристроїв реального часу. Додавши нейро-мережу в систему Matlab Simulink ми зможемо виконувати роботу по пошуку коефіцієнтів регулятора.

Структура програмного забезпечення автоматичної системи регулювання приведена на рис. 2.

**Рис. 2** – Структура програми програмованого логічного контролера

Структурні елементи програми містять різні функціональні призначення для забезпечення функціонування пристрою по наступному алгоритму:

- зчитування області входів;
- виконання програми користувача;
- запис виходів.

Область вводу – це апаратна область створена виробником програмованого логічного контролера у котру відбувається запис величин зчитаних з аналогових і цифрових входів, це відбувається програмною частиною самого програмованого логічного контролера доступу до якої користувачу не надається, дані відображаються у змінних типів bool, word, real, які містять інформацію зчитану з входів.

Область виводу – це частина системної області так само як і область вводу, звідки відбувається зчитування внутрішніх величин і запис їх на відповідні виходи програмованого контролера, цифрові та аналогові. Цифрові виходи використовуються для керування Булевими виходами, а аналогові для задавання рівня напруги чи струму у відповідності до апаратної частини програмованого логічного контролера.

Модуль процесу – це основна частина програми де відбувається керування процесом розпалу, роботи, зупинки котлоагрегату. Ця підпрограма проводить безпосереднє керування системою у автоматичному режимі роботи. Усі етапи роботи розбиваються на кроки і виконання програми відбувається покроково.

Зчитування даних проводимо раз на 5 секунд роботи котлоагрегату, протоколом обміну з контролером служить MODBUS TCP/IP стартова адреса в області буфера обміну даними 1181. Вибірку даних зображено на рис. 3.

Для загального розуміння копію екрану панелі оператора котлоагрегату у процесі роботи зображено на рис.4.

Для вирішення задач пошуку коефіцієнтів з допомогою нейро-мережі слід подбати про її зв'язаність з процесом для можливості проведення повторного перенавчання блоку налаштування коефіцієнтів, для реалізації такого алгоритму доцільним буде використовувати не об'єкт управління а його нейро-мережевий емулятор.

При навчанні нейро-емюлятора застосовувався алгоритм зворотного поширення похибки із застосуванням градієнтного спуску, результат виводу зображено на рис. 5.

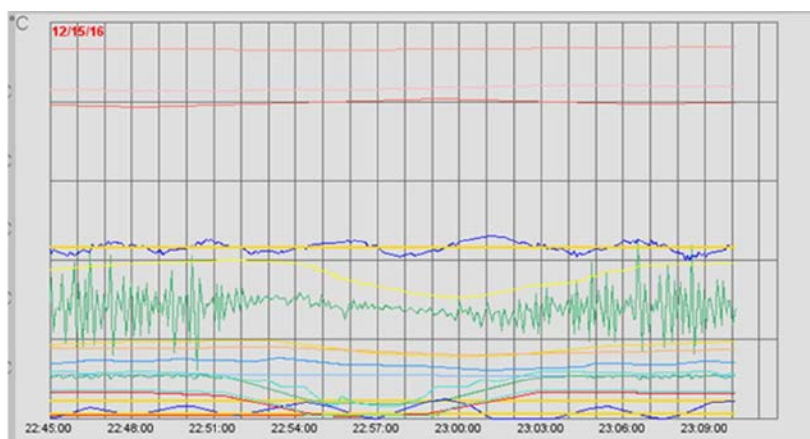


Рис. 3 – Вибірка даних з котлоагрегату

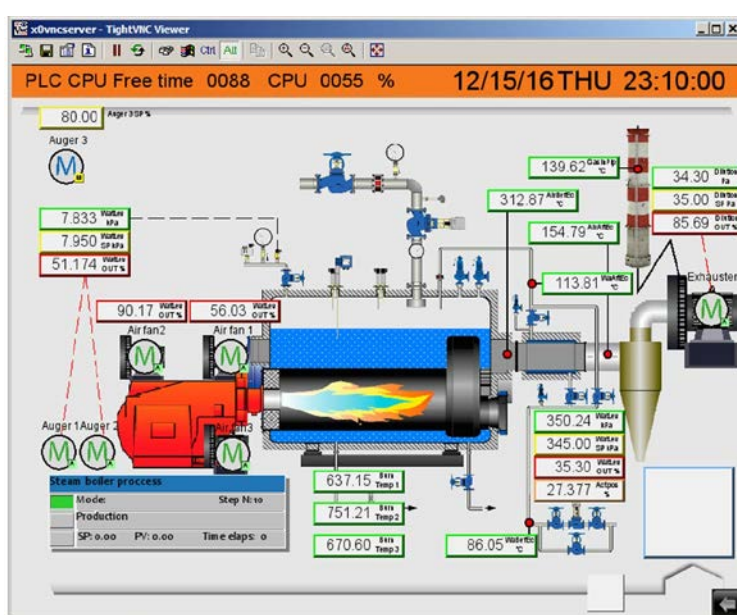


Рис. 4 – Вікно котлоагрегату в роботі

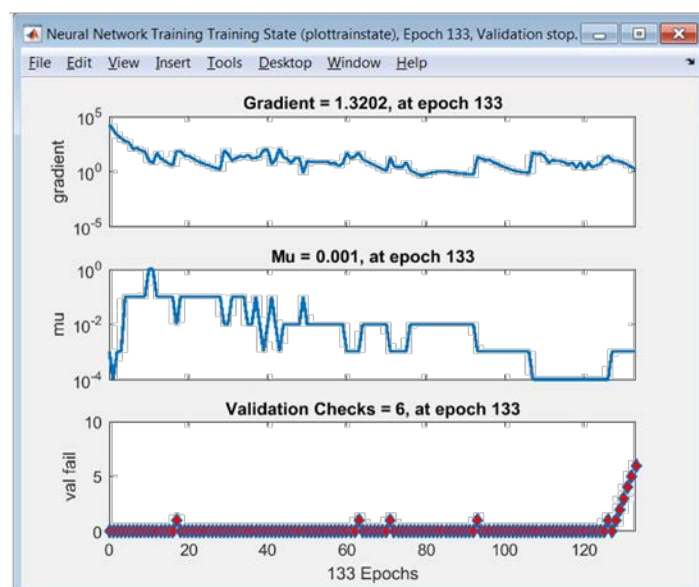


Рис. 5 – Графік градієнту у процесі навчання

Динамічна модель системи регулювання котлоагрегатом зображена на рис. 6.

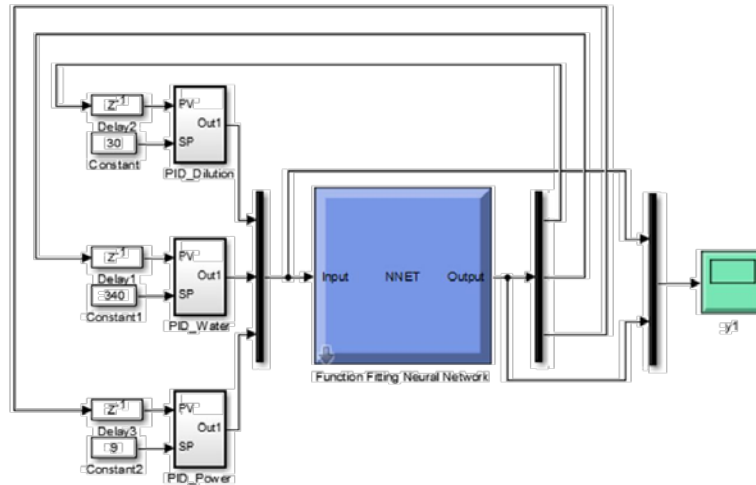


Рис. 6 – Динамічна модель системи регулювання котлоагрегату

Для налаштування параметрів пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора системи керування технологічними параметрами котлоагрегату, у якості тестової використаємо підсистему регулювання розрідження в топці, котла. Ця система є одною із основних що впливає на якість спалювання палива і затримки тепла отриманого від палива у камері згорання для його максимальної передачі вторинному середовищу – воді. Додавши в динамічну модель системи керування додаткові елементи для перевірки результату підбору коефіцієнтів в результаті навчання нейро-адаптивного блоку налаштування. Схему зображено на рис. 7.

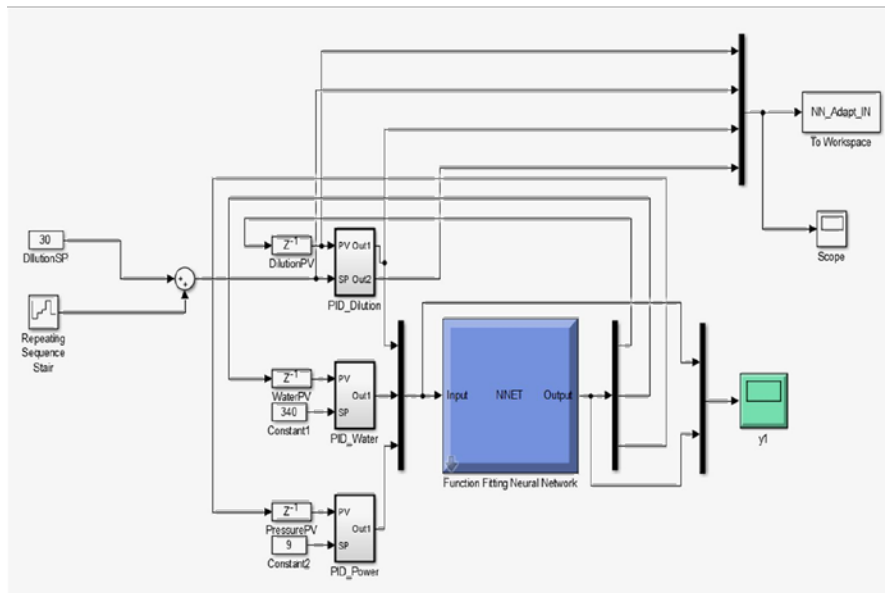


Рис. 7 – Адаптивна модель системи регулювання для отримання вхідних даних для навчання нейро-адаптивного блоку

У модель нейро-емулатора в контур регулювання розрідження навмисне було додано коло по внесенню змін рівня значення заданого розрідження, для внесення відхилень у процесі навчання нейро-мережі. Було зафіксовано наступні коефіцієнти для застосування $K_p=0.39183$, $K_i=0.085589$, $K_d=0.040539$. Якість регулювання і стабільність роботи регулятора розрідження в котлоагрегаті задовольняє точністю і швидкістю переходів. На виході ми отримали нейрон-мережу, що дозволить підлаштовувати систему регулювання у

ході її життєвого циклу. Отримавши дані нових вибірок їх можна завантажити у нейро-адаптивний блок і при прямому проході ми отримаємо нові рекомендовані коефіцієнти.

Висновки

- 1) Проаналізовано алгоритми автоматичного регулювання установок, що дало змогу вибрати алгоритми регулювання параметрів котлоагрегату.
- 2) Проаналізовано сучасні засоби автоматичного регулювання на основі аналізу відомих світових фірм таких як Siemens, Weintek, Owen, що дало можливість реалізувати автоматичну систему регулювання параметрів котлоагрегату.
- 3) Розроблено алгоритм пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора на основі закону ПІД регулювання, що дало можливість спроектувати нейро-адаптивний блок розрахунку коефіцієнтів регулювання.
- 4) На основі отриманих експериментальних даних роботи котлоагрегату отримано вибірки і застосовано їх для навчання нейро-емулятора, що дало змогу реалізувати навчання нейро-адаптивного блоку у реальному часі.

Список використаних джерел:

1. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: Європейський Зелений Курс / Г. С. Грінченко, О. А. Ковтун, В. В. Миколайко, Р. О. Нестеренко, Н. С. Антоненко // *Машинобудування* : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – № 30. – С. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72>.
2. 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. DOI : <https://doi.org/10.46813/2019-120-104>.
3. 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. – № 29. – С. 62–69. DOI : <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>.
4. Столяр О. М. Алгоритми регулювання параметрів технологічного процесу в енергетичних установках / О. М. Столяр // *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології : матеріали VI Всеукраїн. школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2016 (20-21 трав. 2016 р., м. Тернопіль)*. – Тернопіль, 2016. – С. 51–54.
5. Вплив податливості ланок на ККД механізмів і машин / М. Подригайло, О. Полянський, Н. Подригайло, М. Байцур // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. – 2019. – № 1. – С. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.57>.
6. Yesaulov S. Synthesis of Thermal Diagnostic Expert Components with an Artificial Neuron: Array / S. Yesaulov, O. Babicheva, V. Zakurdai // *Municipal Economy of Cities*. – 2022. – № 1(168). – Pp. 18–29. DOI : <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-18-29>.
7. Tripathi N. D. Fuzzy Logic and Neural Networks / N. D. Tripathi, J. H. Reed, H. F. Vanlandingham // *Radio Resource Management in Cellular Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science*. – 2001. – Vol 618. DOI : https://doi.org/10.1007/0-306-47318-6_2.
8. Pavlenko Y. The Future of Neural Networks / Y. Pavlenko, O. Parfyonova // *Грааль науки*. – 2021. – № 4. – Pp. 297–298. DOI : <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.05.2021.053>.
9. 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.
10. Akkouchi K. New application of artificial neural network-based direct power control for permanent magnet synchronous generator / K. Akkouchi, L. Rahmani, R. Lebied // *Electrical Engineering & Electromechanics*. – 2021. – № 6. – Pp. 18–24. DOI : <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.03>.
11. Mendis N. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems / N. Mendis, K. M. Muttaqi, S. Perera // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2014. – Vol. 5, no. 2. – Pp. 944-953. Doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2287874>.
12. IEC 61131-3:2013 Programmable controllers. Part 3: Programming languages. – Access mode : <https://webstore.iec.ch/publication/4552> (Last accessed 11.03.2023).
13. Hassan Adel A. Improvement of direct torque control of induction motor drives using neuro-fuzzy controller / Adel A. Hassan, S. Abo-Zaid, A. Refky // *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. – 2015. – Vol. 2, no. 10. – Pp. 2913-2918.

14. Halvaei Niasar A. Sensorless Direct Power Control of Induction Motor Drive Using Artificial Neural Network / Niasar A. Halvaei, Khoei H Rahimi // *Advances in Artificial Neural Systems*. – 2015. – Vol. 2015. – Pp. 1-9. Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/318589>.

15. Benbouhenni H. Robust direct power control of a DFIG fed by a five- level NPC inverter using neural SVPWM technique / H. Benbouhenni // *Tecnica Italiana-Italian Journal of Engineering Science*. – 2021. – vol. 65, no. 1. – Pp. 119-128. Doi: <https://doi.org/10.18280/ti-ijes.650118>.

References:

1. Hrinchenko, NS, Kovtun, OA, Mykolaiko, VV, Nesterenko, RO & Antonenko, NS 2022, “Zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky AES u ponadproektnyi termin v konteksti perekhodu do tsyrkuliarnoi ekonomiky: Yevropeyskyi Zelenyi Kurs”, [*Ensuring AES operational safety beyond the design period in the context of the transition to a circular economy: European Green Deal*], *Mashynobuduvannia*, iss. 30, pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-30-61-72>.

2. Hrinchenko, N, 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. Section: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, no 2 (120), pp. 104–110. DOI : <https://doi.org/10.46813/2019-120-104>.

3. Hrinchenko, NS, Artiukh, SM, Hrinchenko, VV & Nehodov, SS 2022, “Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahnozyky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii”, [*Unification of methods for technical diagnostics of pipeline systems to ensure safe operation*], *Mashynobuduvannia*, iss. 29, pp. 62–69. DOI : <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>.

4. Stoliar, OM 2016, “Alhorytmy rehuliuвання parametriv tekhnolohichnoho protsesu v enerhetychnykh ustanovkakh”, [*Algorithms for controlling process parameters in power units*], *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii : materialy VI Vseukrain. shkoly-seminaru molodykh vchenykh i studentiv ASIT2016 (20-21 trav. 2016 r., m. Ternopil)*, Ternopil, pp. 51–54.

5. Podryhailo, M, Polianskyi, O, Podryhailo, N & Baitsur, M 2019, ‘Vplyv podatlyvosti lanok na KKD mekhanizmiv i mashyn’, [*Influence of link flexibility on the efficiency of mechanisms and machines*], *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, no 1, pp. 113–120. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i12.57>.

6. Yesaulov, S, Babicheva, O & Zakurdai, V 2022, ‘Synthesis of Thermal Diagnostic Expert Components with an Artificial Neuron: Array’ *Municipal Economy of Cities*, no 1(168), pp. 18–29. DOI : <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-1-168-18-29>.

7. Tripathi, ND, Reed, JH & Vanlandingham, HF 2001, ‘Fuzzy Logic and Neural Networks’ *Radio Resource Management in Cellular Systems. The Springer International Series in Engineering and Computer Science*, Vol. 618. DOI : https://doi.org/10.1007/0-306-47318-6_2.

8. Pavlenko, Y & Parfyonova, O 2021, ‘The Future of Neural Networks’ *Hraal nauky*, no 4, pp. 297–298. DOI : <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.05.2021.053>.

9. 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’ *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (Sozopol, 6-8 September 2019)*, Sozopol, pp. 715–720.

10. Akkouchi, K, Rahmani, L & Lebied, R 2021, ‘New application of artificial neural network-based direct power control for permanent magnet synchronous generator’ *Electrical Engineering & Electromechanics*, no 6, pp. 18–24. DOI : <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.6.03>.

11. Mendis, N, Muttaqi, KM & Perera, S 2014, ‘Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems’ *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 5, no. 2, pp. 944–953. Doi: <https://doi.org/10.1109/tsg.2013.2287874>.

12. IEC 61131-3:2013 Programmable controllers. Part 3: Programming languages 2013, viewed 11 March 2023, <<https://webstore.iec.ch/publication/4552>>.

13. Hassan, Adel A, Abo-Zaid, S & Refky, A 2015, ‘Improvement of direct torque control of induction motor drives using neuro-fuzzy controller’ *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, Vol. 2, no. 10, pp. 2913–2918.

14. Halvaei, Niasar A & Rahimi, V 2015, ‘Sensorless Direct Power Control of Induction Motor Drive Using Artificial Neural Network’ *Advances in Artificial Neural Systems*, Vol. 2015, pp. 1-9. Doi: <https://doi.org/10.1155/2015/318589>.

15. Benbouhenni, H 2021, ‘Robust direct power control of a DFIG fed by a five- level NPC inverter using neural SVPWM technique’ *Tecnica Italiana-Italian Journal of Engineering Science*, vol. 65, no. 1, pp. 119-128. Doi: <https://doi.org/10.18280/ti-ijes.650118>.

Стаття надійшла до редакції 20 квітня 2023 року

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ТЕПЛОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ЇХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

**© Канюк Г.І., Фурсова Т.М., Мезеря А.Ю., Долматов О.А.,
Заїка С.О., Галинський П.Р.**

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.

Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana): ORCID: 0000-0002-1423-0822; tatiana2507@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

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

Долматов Олександр Андрійович (Dolmatov Oleksandr): ORCID: 0009-0005-7842-5206; olexandr.dolmatov@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Заїка Сергій Олександрович (Zaika Serhii): ORCID: 0009-0000-8311-1619; zaika.serhii1@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Галинський Павло Русланович (Halynskii Pavlo): ORCID: 0009-0006-1721-5798; pavlo.halynskii@gmail.com; аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглядається можливість підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи теплових електростанцій для сталого розвитку сучасної вітчизняної енергетики та її безпечної експлуатації шляхом забезпечення якісних вимірів основних технологічних параметрів роботи відповідального обладнання – котельних установок. Проаналізовано значення теплових електростанцій у процесі стабільного розвитку енергетики, їх вплив на навколишнє середовище та необхідність зниження викидів шляхом застосування надійних та енергоефективних заходів. Для покращення якості вимірювань технологічних параметрів у котельних установках пропонується застосування високотемпературних плівкових термопар, які використовуються у вимірюванні високих температур в ракетній, авіаційній техніці і металургії, для вимірювання температур теплоносія в тракті парового котла, а також термометрування поверхні екранних труб котлів. Визначено особливості вимірювальних схем із високотемпературними плівковими термопарами для підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи котельних установок теплоелектростанцій. В умовах тракту котельної установки конструктивно неможливо винести місце приєднання компенсаційних проводів до зони порівняно помірних температур, тому для усунення зазначеного недоліку були використані комбіновані компенсаційні дротяні термоелектроди, які за допомогою апаратного налаштування мають у діапазонах температур спостережень градувальні характеристики, близькі до характеристик плівкових електродів. Для вибраних високотемпературних термопар із матеріалів $Au_{65}Pd_{35}$ - $Pt_{90}Rh_{10}$ були застосовані стандартні термоелектроди із алюмелі і копелі для негативної гілки ($Au_{65}Pd_{35}$) та хромелі й алюмелі для позитивної гілки ($Pt_{90}Rh_{10}$).

Для апробації запропонованого технічного рішення були проведені експериментальні налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах із високотемпературними плівковими термопарами, які проводились на котлі ТПП-312 Зміївської ТЕС. Результати досліджень можуть бути використані для котельних установок теплоелектростанцій, а також і для парогенераторів атомних електростанцій.

Ключові слова: енергетика, котельна установка, високотемпературні плівкові термопари.

Kaniuk G., Fursova T., Boyko T., Dyadyura K., Dolmatov O., Zaika S., Halynskii P.
Increasing the Operational Reliability and Efficiency of Boiler Plant Equipment of Thermal Power Stations by Improving the Quality of Measuring their Technological Parameters.

The present article examines the potential to enhance the operational reliability and safety of domestic energy systems by focusing on the accurate measurement of key technological parameters pertaining to the operation of boiler plants. Given the pivotal role of thermal power stations in facilitating sustainable energy development, the article delves into their environmental impact and emphasizes the imperative of mitigating emissions through the adoption of reliable and energy-efficient measures. To enhance the precision of technological parameter measurements in boiler plants, the utilization of high-temperature film thermocouples is proposed. These thermocouples are commonly employed in high-temperature measurements within the fields of rocketry, aviation technology, and metallurgy. In this context, their application is suggested for the measurement of heat-transfer agent temperatures in the steam boiler system, as well as for the temperature measurement of boiler water-wall tube surfaces. The article identifies the unique attributes of measurement circuits utilizing high-temperature film thermocouples, which contribute to the improved operational reliability and efficiency of boiler plants within thermal power stations. It is acknowledged that due to the structural constraints within the boiler plant system, it is not feasible to situate the connection point of compensating wires in areas of relatively moderate temperatures. To address this limitation, a solution is proposed wherein combined compensating wire thermo-electrodes are employed. Through hardware adjustment, these thermo-electrodes exhibit grading characteristics that closely align with the characteristics of film electrodes within the temperature ranges of observation. For selected high-temperature thermocouples made of $\text{Au}_{65}\text{Pd}_{35}$ - $\text{Pt}_{90}\text{Rh}_{10}$ materials, standard thermos-electrodes made of alumel and copele for the negative branch ($\text{Au}_{65}\text{Pd}_{35}$), and chromel and alumel for the positive branch ($\text{Pt}_{90}\text{Rh}_{10}$) were used. In order to validate the proposed technical solution, a series of experimental tests were conducted to evaluate the performance of compensating combined thermo-electrodes within measurement circuits incorporating high-temperature film thermocouples. These experiments were specifically carried out at the ТПП-210А boiler located at Zmiiv Thermal Power Station. Research results can be used for boiler plants of thermal power stations, as well as for steam generators of nuclear power stations.

Keywords: energy, boiler plant, high-temperature film thermocouples.

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

Енергія є стійкою, якщо вона «задовольняє потреби сьогодення, не ставлячи під загрозу здатність майбутніх поколінь задовольняти власні потреби» [1]. Викопне паливо забезпечує 85% світового споживання енергії, а енергетична система відповідає за 76% глобальних викидів парникових газів. Скорочення викидів парникових газів до рівнів, що відповідають Паризькій угоді 2015 року, вимагатиме загальносистемного перетворення способів виробництва, розподілу та споживання енергії. Спалювання копалин палива є

основним джерелом забруднення повітря, яке, за оцінками, щорічно призводить до загибелі 7 мільйонів людей. Тому дуже актуальними є завдання підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи теплоенергетичного обладнання [2-3].

Підвищення ККД електростанцій призводить до скорочення витрати палива, отже, і викидів у довкілля [4-5]. Ефективність роботи електростанцій визначається їх надійною експлуатацією та безаварійною роботою, для чого необхідні якісні виміри основних технологічних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

До основного енергетичного обладнання теплоелектростанцій відносяться парові котли (парогенератори). Їх конструкція, принцип роботи та технологічні процеси розглядаються в роботах [4-8]. Питанням енерго- та ресурсозбереження у котельних установках присвячені роботи [9-12].

У роботах [13-14] запропоновано та обґрунтовано застосування високотемпературних плівкових термопар (ВПТ) для вимірювання високих температур конструкцій авіаційних та ракетних двигунів, а також у металургії. Отримані результати можна розглядати як застосування ВПТ для вимірювання температур теплоносія в тракті парового котла, а також термометрування поверхні екранних труб парових котлів.

Метою роботи є аналіз можливостей підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів.

Виклад основного матеріалу

Особливістю вимірювальних схем з ВПТ є необхідність додаткового роз'єму – області, в якій до плівкових термоелектродів приєднуються відвідні (компенсаційні) термоелектродні дроти [13-14].

Термоелектрична електрорушійна сила (термо ЕРС) плівкових електродів відрізняється від термо ЕРС дрітятих електродів з однакових матеріалів. При досить високій температурі додаткового роз'єму це призводить до значних похибок у вимірі температур.

У загальному випадку, коли термоелектрична характеристика відвідних дрітятих електродів $\dot{A}_{CD}(t,0)$ відрізняється від характеристики пари плівкових електродів $\dot{A}_{AB}(t,0)$ (рис. 1) справедливий вираз:

$$\dot{A}_{AB}(t,0) = E + \Delta E(t,0),$$

де $\dot{A}_{CD}(t,0) = \dot{A}_{AB}(t_0,0) - \dot{A}_{CD}(t_0,0)$;

t – температура спаю ВПТ, $^{\circ}\text{C}$;

t_0 – температура додаткового роз'єму, $^{\circ}\text{C}$;

$\dot{A}$ – виміряна термо ЕРС.

Таким чином, в цьому випадку необхідно крім реєстрації основного сигналу $\dot{A}$ визначати також температуру місця під'єднання відвідних проводів і вводити відповідну поправку $\Delta E(t,0)$, що часто є настільки ж складним завданням, як і визначення основного сигналу. Адже в умовах тракту котельної установки конструктивно неможливо винести місце приєднання компенсаційних проводів до зони навіть порівняно помірних температур.

Для усунення зазначеного недоліку були використані розглянуті в роботі [15] комбіновані компенсаційні дрітятні термоелектроди, які за допомогою апаратного налаштування мають у діапазонах температур, що спостерігаються, градувальні характеристики, близькі до характеристик плівкових електродів.

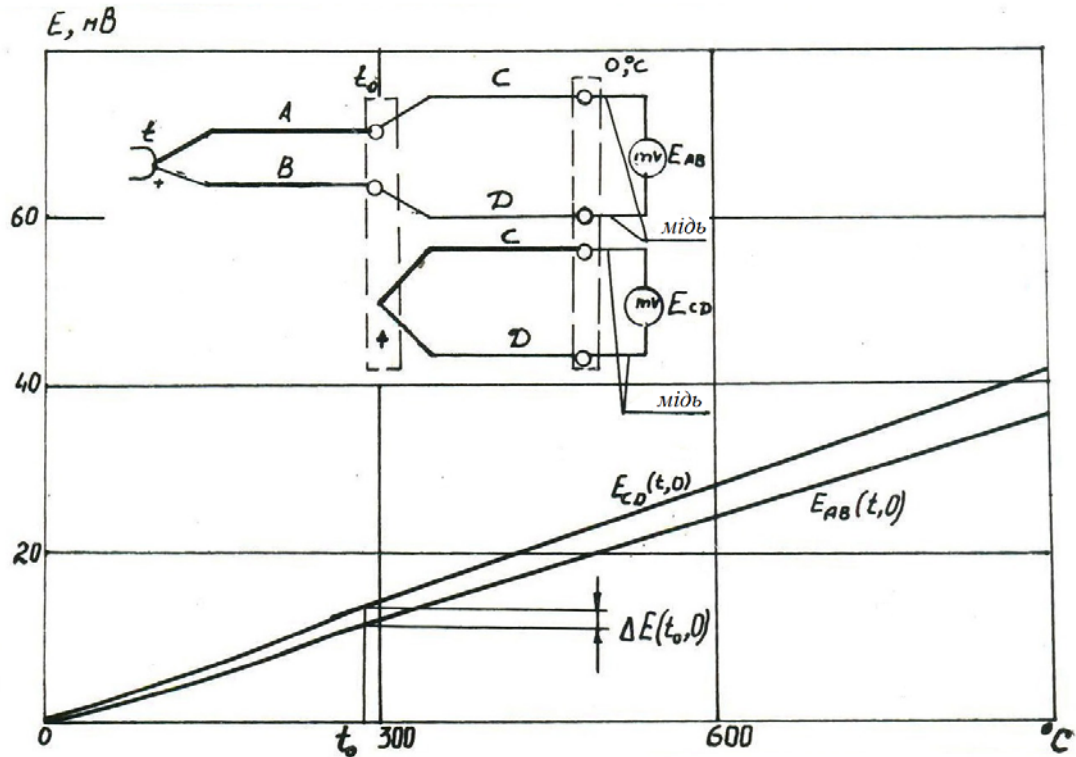


Рис. 1 – Принципові особливості вимірвальної схеми з ВПТ

Вираз еквівалентної термо ЕРС багатожильного дроту, що складається з різних матеріалів, наступний [15]:

$$E_{ек} = E_1 \frac{R_1}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} (E_1 \ E_2 \ \dots \ E_n), \quad (1)$$

де E_1, E_2, E_n – термо ЕРС окремих дротів 1, 2, ..., n відносно платиного електрода порівняння; R_1, R_2, R_n – електричні опори окремих дротів 1, 2, ..., n.

Для ланцюга з двох дротів формула (1) має вигляд:

$$E_{ек} = E_1 \frac{E_2 R_1 + E_1 R_2}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} = \frac{E_1 K + E_2}{1 + K}, \quad (2)$$

де $K = \frac{R_1}{R_2}$ – коефіцієнт настройки.

Умовою компенсації похибки сигналу, що відповідає сигналу основного термоелектрода комбінованим дротяним електродам при температурі роз'єму t_0 , є виконання наступного співвідношення:

$$E_{оос}(t_0) = E_{эк}(t_0) \frac{E_1(t_0) K_{t_0} + E_2}{1 + K_{t_0}}, \quad (3)$$

де $K_{t_0} = \frac{E_1(t_0) - E_{оос}(t_0)}{E_{оос}(t_0) - E_2(t_0)}$.

Необхідне відношення опорів гілок комбінованого дроту на практиці здійснюється паралельним з'єднанням різнорідних стандартних дротяних термоелектродів із регульованими опорами, що підключаються (рис. 2). Налаштування компенсаційних комбінованих електродів здійснюється шляхом підбору опорів $R_1 - R_4$ за температури t_0 - місця роз'єму.

Як комбіновані компенсаційні термоелектроди для вибраних ВПТ із матеріалів $Au_{65}Pd_{35}$ - $Pt_{90}Rh_{10}$ нами були застосовані такі стандартні термоелектроди: негативна гілка ($Au_{65}Pd_{35}$) – дроти з алюмелі та копелі; позитивна гілка ($Pt_{90}Rh_{10}$) – дроти з хромелі та алюмелі.

Для ВПТ Pt_{100} - $Pt_{90}Rh_{10}$ застосовували такі термоелектроди: негативна гілка (Pt_{100}) – дроти з хромелі та копелі; негативна гілка ($Pt_{90}Rh_{10}$) – дроти із хромелі та алюмелі.

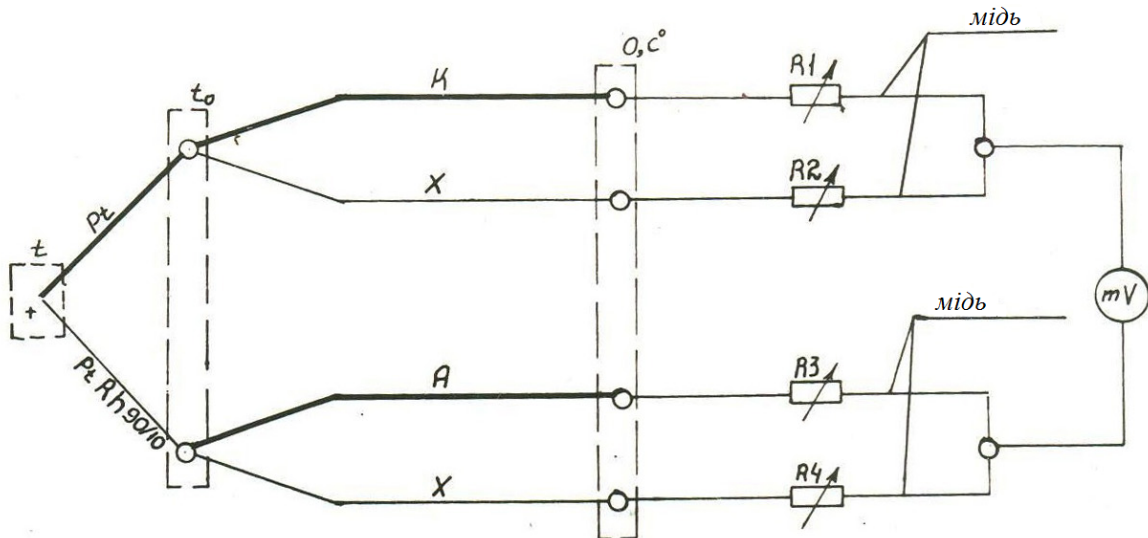


Рис. 2 – Принципова схема виконання поелектродної компенсації при вимірюванні температур за допомогою ВПТ з Pt_{100} - $Pt_{90}Rh_{10}$ термоелектродами

На практиці підбір стандартних проводів із заданими термоелектродними властивостями ускладнений, тому налаштування компенсаційних комбінованих електродів розрахунковим шляхом може призвести до суттєвих помилок. Звідси, налаштування практично проводиться експериментально шляхом налаштування змінних опорів $R_1 - R_4$ з наступною перевіркою величини $E_{ек}$ по всьому діапазоні можливих температур роз'єму. Схема налаштування наведена на рис. 3.

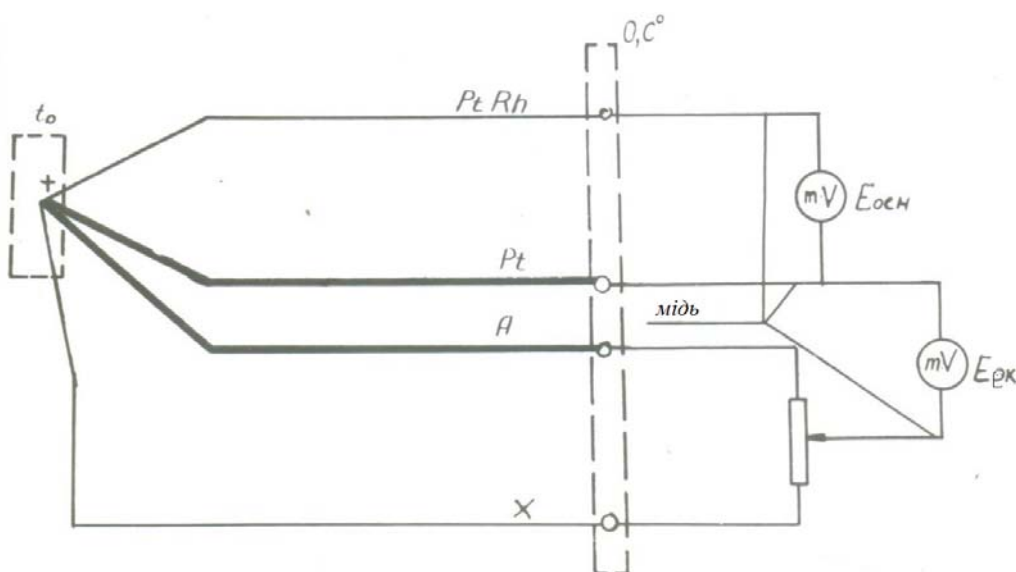


Рис. 3 – Схема налаштування комбінованих компенсаційних термоелектродів, що використовуються при вимірюванні температури за допомогою ВПТ

Експериментальні дані були отримані для котельної установки ТПП-312 Зміївської ТЕС.

Результати експериментального налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах з ВПТ, наведені в таблиці.

Таблиця 1 – Результати експериментального налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів

ВПТ $Au_{65}Pd_{35}$ - $Pt_{90}Rh_{10}$	$t, ^\circ C$	$E_{ек}, мВ$	$E_{осн}, мВ$	$\Delta E = E_{осн} - E_{ек}, мВ$	$\Delta t = \Delta t (\Delta E), ^\circ C$
Експеримент 1	50	1,75	1,73	-0,02	0,5
	100	3,65	3,65	0	0
	150	5,775	5,74	-0,035	-0,8
Експеримент 2	50	1,695	1,73	0,035	1
	100	3,70	3,65	-0,05	-1,4
	150	5,825	5,74	-0,085	-1,5
Експеримент 3	50	1,72	1,73	0,01	0,3
	100	3,625	3,65	0,025	0,7
	150	5,775	5,74	-0,035	-0,5
ВПТ – Pt - $Pt_{90}Rh_{10}$	$t,$	$E_{ек}, мВ$	$E_{осн}, мВ$	$\Delta E = E_{осн} - E_{ек}, мВ$	$\Delta t = \Delta t (\Delta E), ^\circ C$
Експеримент 1	50	0,275	0,281	0,045	-0,8
	100	0,614	0,607	0,0071	1
	150	0,978	0,968	0,01	1,3
Експеримент 2	50	0,279	0,281	0,002	-0,4
	100	0,601	0,607	0,0063	0,9
	150	0,98	0,968	0,0123	1,6
Експеримент 3	50	0,2377	0,281	0,004	-0,7
	100	0,615	0,607	0,0079	1,1
	150	0,977	0,968	0,0092	1,2

Висновки

Якісні виміри основних технологічних параметрів роботи котельних установок необхідні для сталого розвитку сучасної енергетики.

Для покращення якості вимірювань технологічних параметрів у котельних установках пропонується застосування ВПТ для вимірювання температур теплоносія у тракті парового котла, а також для термометрування поверхні екранних труб парових котлів.

Проаналізовано особливості вимірвальних схем з ВПТ для підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи котельних установок теплоелектростанцій.

Проведено експериментальне налаштування компенсаційних комбінованих термоелектродів, що використовуються у вимірвальних ланцюгах з ВПТ.

Результати досліджень можуть бути використані і для парогенераторів АЕС.

Список використаних джерел:

1. Sustainable energy. – Access mode : https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_energy. (Last accessed 11.05.2023).
2. Destination 2030. Accelerating progress on the Sustainable Development Goals. – Access mode : <https://www.undp.org/destination-2030-accelerating-progress-sustainable-development-goals>. (Last accessed 11.05.2023).
3. Energy Community. – Access mode : <https://www.energy-community.org/Ukraine/overview.html>. (Last accessed 11.05.2023).
4. Енергетика: історія, сучасність та майбутнє. – Режим доступу : <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3>. (дата звернення 11.05.2023).
5. Резников М. И. Паровые котлы тепловых электростанций / М. И. Резников, Ю. М. Липов. – М.: Мир, 1981.
6. Kozioł J. An optimization strategy using probabilistic and heuristic input data for fuel feeding boilers with regards to the trading effects at CO₂ allowances / J. Kozioł, J. Czubala // *Energy*. – 2013. – Vol. 62. DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.079.
7. Ion I. Effect of Energy Modernization of a Steam Boiler on the Economic Efficiency / I. Ion, I. Stanciu // *Annual conference of the University of Rousse*. – 2013. – Vol. 52. – Access mode : <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.2/1.2-4.pdf> (Last accessed 11.05.2023).
8. Wang Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler / Y. Wang, X. Li, T. Mao, P. Hu, X. Li, G. – *Energy*. – 2022. – Part A. DOI:10.1016/j.energy.2022.125128.
9. Мисак Й. С. Вплив якості палива на техніко-економічні показники котельних установок ТЕС / Й. С. Мисак // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація*. – Львів, 2000. – № 399. – С. 89–96.
10. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
11. Дуэль М. А. Развитие систем энергосберегающего автоматизированного управления энергопроизводством ТЭС и АЭС Украины / М. А. Дуэль, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря. – Харьков : Точка, 2013. – 388 с.
12. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.
13. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки) / Д. Ф. Симбирский. – Киев : Техника, 1976. – 208 с.
14. А. с. № 1712797 СССР, МКИ G 01 K 7/02. Способ изготовления высокотемпературной термопары / Гулей А. Б., Скрипка А. И., Симбирский Д. Ф., Маштылева А. П., Олейник А. В. // *Открытия. Изобретения*. – 1992. – № 6.
15. Григорьев Л. С. Устранение погрешностей ВПТ, вызванных паразитными термопарами в измерительной цепи / Л. С. Григорьев, Д. Ф. Симбирский, А. В. Олейник // *Экспериментальные методы термостойкости газотурбинных двигателей*. Вып. 1. – Харьков, 1973. – С. 47–52.

References:

1. Wikipedia n.d. *Sustainable energy*, viewed 11 May 2023, <https://en.wikipedia.org/wiki/Sustainable_energy>
2. Destination 2030. Accelerating progress on the Sustainable Development Goals, viewed 11 May 2023, <<https://www.undp.org/destination-2030-accelerating-progress-sustainable-development-goals>>.
3. Energy Community n.d., viewed 11 May 2023, <<https://www.energy-community.org/Ukraine/overview.html>>.
4. Enerhetyka: istoriia, suchasnist ta maibutnie n.d., [*Energy: history, modernity and the future*], viewed 11 May 2023, <<http://energetika.in.ua/ua/books/book-3>>.
5. Reznikov, MY & Lypov, MY 1981, *Parovie kotli teplovikh elektrostantsyi*, [*Steam boilers in thermal power plants*], Myr, Moskva.
6. Kozioł, J & Czubala, J 2013, 'An optimization strategy using probabilistic and heuristic input data for fuel feeding boilers with regards to the trading effects at CO₂ allowances' *Energy*, Vol. 62, DOI: 10.1016/j.energy.2013.03.079.
7. Ion, I & Stanciu, I 2013, 'Effect of Energy Modernization of a Steam Boiler on the Economic Efficiency' *Annual conference of the University of Rousse*, Vol. 52, viewed 11 May 2023, <<https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp13/1.2/1.2-4.pdf>>.

8. Wang, Y, Li, X, Mao, T, & Hu, P 2022, 'Wang Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler' *Energy*, part A, [DOI:10.1016/j.energy.2022.125128](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125128).
9. Mysak, YS 2000, 'Vplyv yakosti palyva na tekhniko-ekonomichni pokaznyky kotelnykh ustanovok TES', [*Influence of fuel quality on technical and economic performance of thermal power plant boilers*], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia*, no 399, pp. 89–96.
10. Kaniuk, HI 2012, *Rezervi enerhosberehaiushcheho upravleniia tekhnolohycheskymy protsessamy na deistviushchykh TES y AES*, [*Reserves for energy-saving process control at operating thermal power plants and nuclear power plants*], Tochka, Kharkov.
11. Duel, MA, Kaniuk, HI & Mezeria, AYU 2013, *Razvytye system enerhosberehaiushcheho avtomatyzirovannoho upravleniia enerhoproyzvodstvom TES y AES Ukrainy*, [*Development of energy-saving automated energy management systems for Ukrainian TPPs and NPPs*], Tochka, Kharkov.
12. Kaniuk, HY, Mezeria, AYU & Suk, YV 2016, *Metodi y modely enerhosberehaiushcheho upravleniia enerhetycheskymy ustanovkamy elektrostantsyi*, [*Methods and models for energy-saving control of power plants*], Tochka, Kharkov.
13. Symbyrskyi, DF 1976, *Temperaturnaia dyagnostyka dvyhatelei (plenochnaia termometryia y optimalnye otsenky)*, [*Temperature diagnostics of engines (foil thermometry and optimum estimates)*], Tekhnika, Kyev.
14. Hulei, AB, Skrypka, AY, Symbyrskyi, DF, Mashtileva, AP. & Oleinyk, AV 1992, *Sposob yzghotovleniia visokotemperaturnoi termopari*, [*Method of producing a high-temperature thermocouple*], № 1712797 SSSR.
15. Hryhorev, LS, Symbyrskyi, DF & Oleinyk, AV 1973, 'Ustraneniye pohreshnostei VPT, vizvannykh parazytnymy termoparamy v yzmeritelnoi tsepy', [*Correction of HPT errors caused by parasitic thermocouples in the measuring circuit*], *Ekspyrymentalnye metody termoprochnosti hazoturbynnikh dvyhatelei*, no. 1, pp. 47– 52.

Стаття надійшла до редакції 12 травня 2023 року

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КЕРУВАННЯ

**© Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Чеботарьов А.М., Василець Т.Ю.,
Фурсова Т.М., Канюк М.Г.**

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

Чеботарьов Антон Миколайович (Chebotarev Anton): ORCID: 0000-0003-4279-1392; chebotaryov.an@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Василець Тетяна Юхимівна (Vasylets Tetiana): ORCID: 0000-0002-2148-8645; vasyletsz.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.

Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana): ORCID: 0000-0003-1900-7432; tatiana2507@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Канюк Максим Геннадійович (Kaniuk Maksym): ORCID: 0009-0005-6724-8726; maksym.kaniuk@gmail.com, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Вимірювання гідравлічних параметрів технологічних процесів (витрати рідини, напору та тиску) є одним із способів досягнення енергетичної ефективності в різних галузях промисловості, у тому числі на теплових, атомних та гідравлічних електростанціях при автоматизованому керуванні енергоблоками та окремими силовими установками (насоси, турбіни, теплообмінники та інше). Метою досліджень є аналіз метрологічних характеристик засобів вимірювання гідравлічних параметрів для завдань енергозберігаючого керування обладнанням теплових, атомних та гідравлічних електростанцій та визначення методів та засобів вимірювання, що дозволяють забезпечити практичну реалізацію принципів енергозберігаючого керування. Серед великої кількості методів вимірювання витрати особливе місце займають системи вимірювання витрати на базі змінного перепаду тиску. У статті показані основні напрямки, в рамках яких ведуться дослідження щодо покращення та підвищення ефективності методів вимірювання витрати рідини. Проведено аналіз кількісного розподілу методу змінного перепаду тисків та вимірювальних систем на його основі, розглянуто та проаналізовано ринок розподілу витратомірних систем. Діяльність показано, частка поширення традиційних технологій вимірювання витрати займає половину всього парку витратомірних засобів і систем. Проведено аналіз методів вимірювання витрати рідини та тиску (напору) та визначено методи, які є найбільш перспективними для застосування у завданнях енергозберігаючого керування установками електростанцій. Проведено короткий аналіз парку вітчизняних та зарубіжних витратомірів різного типу, наведено основні метрологічні характеристики засобів вимірювання. Зроблено висновок щодо доцільності застосування різних типів

вимірвальних систем в інформаційно-вимірвальних комплексах автоматизованих систем керування енергоблоками електростанцій.

Ключові слова: вимірювання, методи вимірювання витрати рідини, методи вимірювання тиску і напору.

Kaniuk G.I., Mezerya A.Y., Chebotarev A.M., Vasilets T.Y., Fursova T.M., Kaniuk M.G.
Analysis of metrological characteristics of tools for measuring hydraulic parameters of power plants for energy-saving control.

Measurement of hydraulic parameters of technological processes (fluid flow and pressure) is one of the ways to achieve energy efficiency in various industries, including thermal, nuclear and hydraulic power plants with automated control of power units and individual power plants (pumps, turbines, heat exchangers and other). The aim of the research is to analyze the metrological characteristics of means for measuring hydraulic parameters for the tasks of energy-saving control of equipment of thermal, nuclear and hydraulic power plants and to determine the methods and means of measurement that allow providing practical implementation of the principles of energy-saving management. Among the large number of flow measurement methods, a special place is occupied by flow measurement systems based on variable pressure drop. The article shows the main directions in which research is being carried out to improve and increase the efficiency of methods for measuring fluid flow. A quantitative analysis was conducted to examine the distribution of the variable pressure drop method and the corresponding measuring systems. The study focused on evaluating the market for flow measuring systems, specifically analyzing its distribution patterns.

This research investigates the distribution of traditional flow measurement technologies within the fleet of flow meters and systems, comprising approximately half of the total. A comprehensive analysis of fluid flow and pressure measurement methods is conducted, with a focus on identifying the most promising methods for application in energy-saving control of power plant installations.

The study includes a concise evaluation of domestic and foreign flow meters of various types, highlighting their main metrological characteristics. The conclusion is made about the expediency of using various types of measuring systems in information-measuring complexes of automated control systems for power units at power plants.

Keywords: measurement, liquid flow measurement methods, pressure measurement methods.

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

При проведенні натурних та модельних приймально-здавальних випробувань основного обладнання електростанцій [1], а також у процесі експлуатації для завдань керування [2] та діагностики [3] виникає необхідність вимірювання тиску, напору та витрати рідини, точність визначення яких залежить як від методів вимірювання даних величин, так й від використовуваних засобів виміру (ЗВ).

Основне завдання систем автоматизованого керування (АСК) є енергозбереження. Оскільки йдеться про частках відсотка в прирості коефіцієнта корисної дії (ККД), то на інформаційно-вимірвальні комплекси систем АСК накладаються високі вимоги щодо точності вимірювання технологічних параметрів з метою гарантованого виявлення цього незначного приросту та можливості підтримки оптимального режиму роботи. Так, наприклад, Міжнародна Електротехнічна Комісія (МЕК) при проведенні модельних приймально-здавальних випробувань гідравлічних турбін рекомендує вимірювати витрату води з похибкою не більше $\pm(0,3 \div 0,5) \%$ [1]. Проте вже зараз у практиці випробувань моделей гідротурбін вважається бажаним, щоб ця похибка не перевищувала $\pm(0,1 \div 0,2)\%$. При цьому значення робочих витрат під час випробувань досягають $10 \text{ м}^3/\text{с}$. Необхідні

похибки та динамічний діапазон вимірюваних потоків рідини відповідає метрологічних характеристик робочих еталонів витрати рідини за ДСТУ 4403:2005 [4]. Подібні вимоги щодо точності виміру бажані і для систем енергозберігаючого керування у всьому діапазоні нормальної експлуатації обладнання [2].

Така висока точність вимірювань вимагає аналізу метрологічних характеристик засобів вимірювання гідравлічних параметрів, що є одними з основних технологічних параметрів теплових, атомних і гідравлічних електростанцій та значною мірою визначають ефективність роботи енергоблоків.

Характерними рисами вимірювань у реальних умовах електростанцій є: можливий динамічний характер досліджуваного параметра; використання при випробуванні трубопроводів великих діаметрів ($D_y=300\text{мм}$ та більше); нерівномірний розподіл епюри швидкостей перерізу потоку; вплив показань ЗВ від зовнішніх факторів (температура, тиск тощо); висока вимога до точності вимірювання параметра та ін.

Відповідно до вищесказаного, методи вимірювання напору і витрати рідини повинні забезпечувати необхідну якість вимірювань, а ЗВ повинні мати відповідні метрологічні характеристики, що дозволяють використовувати даний ЗВ в умовах експлуатації з метою отримання необхідної точності.

Аналізу основних існуючих методів вимірювання напору та витрати рідини, номенклатури вітчизняних та світових виробників, що випускаються ЗВ, а також теоретичному обґрунтуванню застосування методів та засобів вимірювання вищевказаних параметрів в умовах експлуатації електростанцій присвячена справжня робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до даних опитувань [5], які проводилися компаніями Flow Research та Ducker Worldwide, найпоширенішим методом вимірювання витрати є метод змінного перепаду тиску. У рамках цієї роботи було опитано та досліджено велику кількість найпередовіших компаній світу на всіх континентах (близько 300 компаній). Також відповідно до роботи [6] частка систем вимірювання та приладів, заснованих на традиційних технологіях вимірювання витрат речовин, становить близько 50 % всього світового парку витратомірних систем. У роботі [5] говориться, що за результатами опитування системи вимірювання, що ґрунтуються на змінному перепаді тиску, становлять майже одну третину (27,2 %) усіх методів вимірювання витрати.

Все це є свідченням того, що метод змінного перепаду тиску є домінуючим способом вимірювання витрати, особливо при вимірі великих потоків речовини на великих трубах діаметру відповідно до рекомендації [7].

Одним із методів підвищення точності аналізованих систем є підвищення точності вимірювальних перетворювачів фізичних величин, що входять до складу систем як канали та елементи. Значне підвищення класів точності перетворювачів перепаду тиску, тиску та температури, безсумнівно, призведе до підвищення точності всієї системи вимірювання витрати та кількості речовин.

Крім конструктивних рішень та модернізації головних складових елементів систем вимірювання витрати та кількості речовин, які не зазнали значних змін за останні роки, суттєво покращувалися способи визначення та методи уточнення різних коефіцієнтів, що входять до складу функції перетворення, що сприяло зменшенню похибки витрати.

Одним з важливих параметрів, що лежить в основі методу, є так званий коефіцієнт закінчення звужуючого пристрою (ЗП), що представляє собою відношення дійсного значення витрати, що протікає через ЗП, до відповідного значення, розрахованого згідно з теоретичною моделлю витрати через цей же пристрій.

Відповідно до робіт [9, 10] пропонується переглянути концепцію обчислення коефіцієнтів закінчення звужуючих пристроїв, відмовившись від залежності від числа

Рейнольдса. У роботі [9] пропонується альтернативне рівняння, що залежить тільки від перепаду тиску для даного коефіцієнта, який безперервно вимірюється системою. Це дозволить відмовитись від визначення коефіцієнта закінчення методом численних ітерацій, що значно прискорить процес обчислення, значно скоротить пам'ять програм, що реалізують алгоритм вимірювання витрати, спростить сприйняття даних параметрів. Пропоноване рівняння для коефіцієнта виглядає так:

Крім досліджень щодо уточнення самих коефіцієнтів закінчення і розширення ЗП, були проведені експерименти з оцінки впливу температури та різних впливів потоку, що обумовлюють, на процес вимірювання витрати [11].

Результати роботи [11] показали, що температура в діапазоні від 20 до 85°C абсолютно не впливає на вихідні коефіцієнти закінчення, тим самим унеможливується вплив цієї величини на коефіцієнт закінчення.

Не залишаються осторонь роботи з вивчення ділянок стабілізації для витратомірів, обумовлені структурою потоку і впливом шорсткості трубопроводів. Результати цих досліджень відбиваються як і роботах [8, 11], і у роботах типу [12, 13].

Одним із напрямів удосконалення методу є також захист від недостовірних вимірів та спотворень вимірюваної інформації. У цьому напрямку ведуться роботи зі створення маніфольдів та вентиляльних блоків, які виключають умисне викривлення даних. Наприклад, у роботі [14] повідомляється про створення безвентильних блоків, які забезпечують суворе виконання порядку включення чи відключення вентилів для відбору тиску до і після звужуючого устрою одну дію.

Все це показує, що найбільш традиційний та апробований метод вимірювання витрати рідин не вичерпав можливостей щодо підвищення точності та надійності. Активно ведуться дослідження, які б поліпшенню методу як у рівні моделювання величин, які входять у функцію перетворення системи, і лише на рівні підвищення надійності апаратної частини.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою досліджень є аналіз метрологічних характеристик засобів виміру гідравлічних параметрів (витрата рідини, тиск, напір) для завдань енергозберігаючого керування обладнанням теплових, атомних та гідравлічних електростанцій (нагінатчі, теплообмінники, турбіни, котли та інше) та визначення методів та засобів вимірювання, які дозволяють забезпечити практичну реалізацію принципів енергозберігаючого керування.

Виклад основного матеріалу

Номенклатура витратомірної техніки досить велика, а точність вимірювання саме цього показника грає вирішальну роль при проведенні модельних випробувань, тому слід зупинитися, в першу чергу, на основних метрологічних принципах вимірювання саме цього параметра.

Існує багато різних ознак, якими можна класифікувати ЗВ витрати рідини: за класом точності; діапазонів вимірів; виду вихідного сигналу; динамічними характеристиками тощо. Однак найбільш загальною є класифікація за принципами вимірювань, за тими фізичними явищами, за допомогою яких вимірювана величина перетворюється на вихідний сигнал первинного перетворювача витратоміра.

За принципом вимірювання витратоміри класифікують за такими основними групами (зазначений для кожної класифікаційної групи витратомірів принцип перетворення відноситься до їх первинних перетворювачів - датчиків):

- витратоміри змінного перепаду тиску (з пристроями, що звужують, з гідравлічними опорами, відцентрові, з напірними пристроями, струменеві);
- витратоміри обтікання (витратоміри постійного перепаду – ротаметри, поплавкові, поршневі, гідродинамічні), що перетворюють швидкісний натиск у переміщення тіла, що обтікає;

- тахіметричні витратоміри (турбінні з аксіальною або тангенціальною турбіною, кулькові), що перетворюють швидкість потоку в кутову швидкість обертання обтічного елемента (лопат турбінки або кульки);
- електромагнітні витратоміри, що перетворюють швидкість рухомої в магнітному полі провідної рідини в ЕРС;
- ультразвукові витратоміри, засновані на ефекті захоплення звукових коливань середовищем, що рухається;
- інерційні витратоміри (турбосилові, коріолісові, гігроскопічні), засновані на інерційному впливі маси рідини, що рухається з лінійним або кутовим прискоренням;
- теплові витратоміри (калориметричні, термоанемометричні), засновані на ефекті перенесення тепла середовищем, що рухається, від нагрітого тіла;
- оптичні витратоміри, засновані на ефекті захоплення світла рухомим середовищем (Фізо-Френелі) або розсіювання світла частинками, що рухаються (Допплера);
- меточні витратоміри (з тепловими, іонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними мітками), засновані на вимірюванні швидкості або стані мітки при проходженні її між двома фіксованими перерізами потоку.

Класифікацію методів вимірювання витрати, для наочності, можна як схеми на рис.1, а методи виміру тиску – на рис.2.

З рекомендованих МЕК витратомірів найбільше застосування знайшли витратоміри змінного перепаду тисків та водозливи з тонкою стінкою. Дуже перспективними є електромагнітні, акустичні та коріолісові витратоміри. Ці прилади, в принципі, при індивідуальному градуюванні здатні забезпечити необхідні точності вимірювання витрати рідини в трубопроводах електростанцій.

Застосування витратомірів інших типів обмежене різними факторами. Сюди відносяться, в першу чергу, висока точність, великі значення витрати рідини, що протікає в трубопроводах більшості установок електростанцій, високі динамічні показники потоку рідини та ін.

Отже, варто зупинитися на витратомірах змінного перепаду тисків, електромагнітних, акустичних і коріолісових витратомірах.

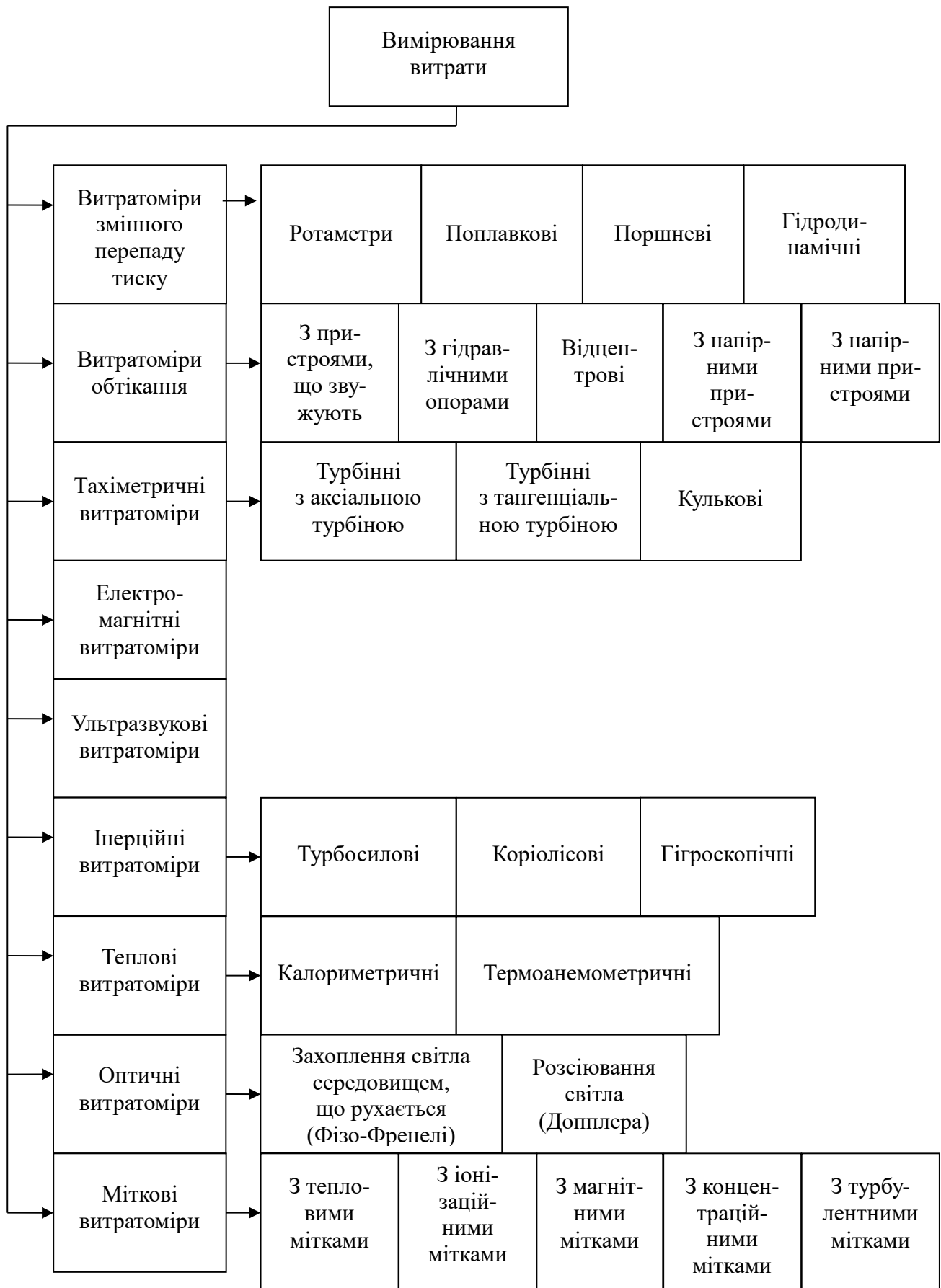
Метод змінного перепаду тиску один із найбільш старих та вивчених методів вимірювання витрати. Це, а також можливість непрямого градуювання та перевірки стандартизованих первинних перетворювачів – звужуючих пристроїв, що реалізують метод, їх простота та надійність, серійний випуск вторинних перетворювачів – дифманометрів зумовило його надзвичайно широке (переважно порівняно з іншими) використання у практиці промислових вимірів витрати.

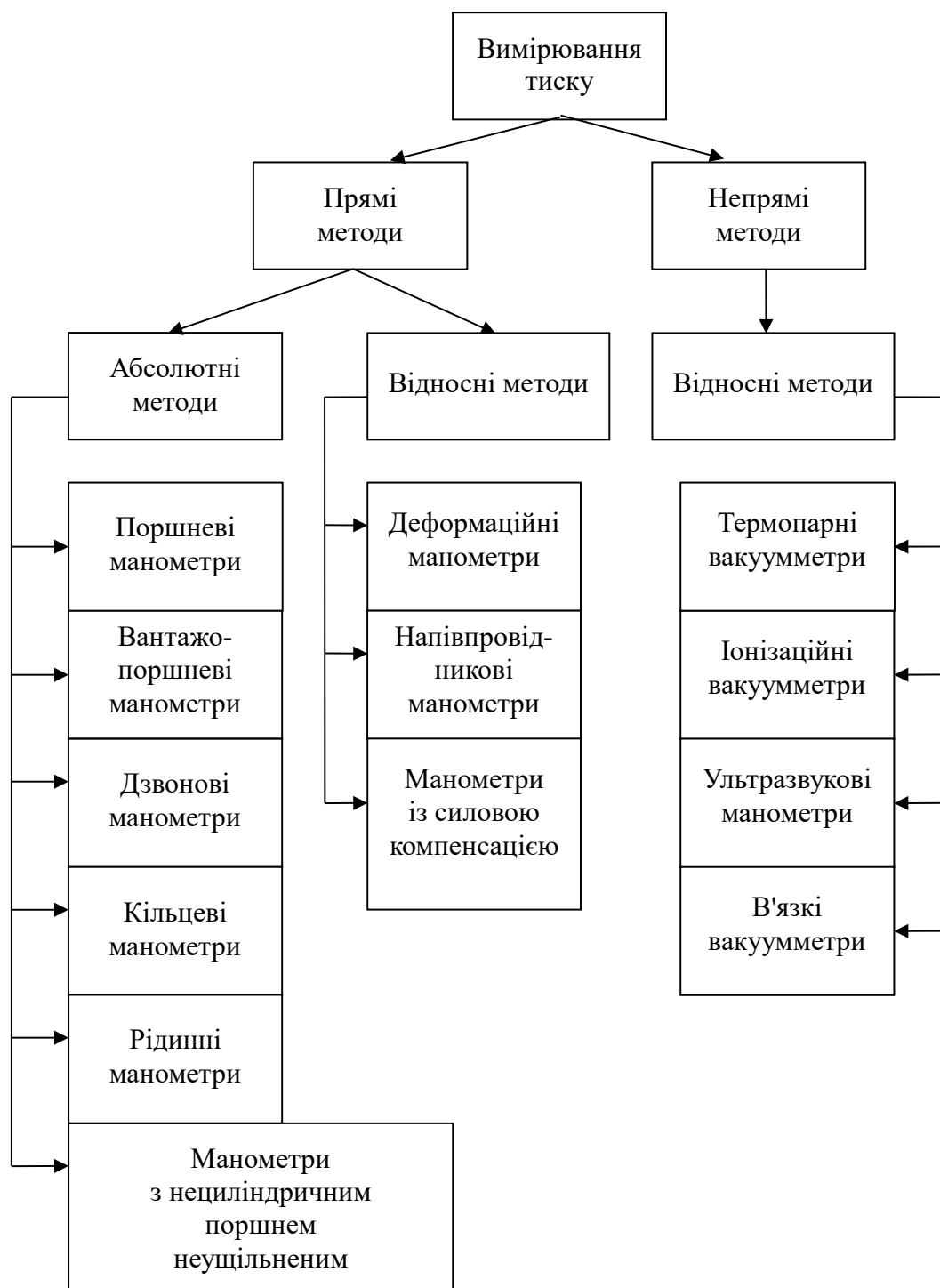
І водночас основу цього суто гідродинамічного методу лежать настільки складні фізичні процеси деформації потоків, настільки багато неконтрольованих чинників впливає характер цих процесів, що його нині обмежено, хоча можливості його «метрологічного вдосконалення» далеко ще не вичерпані [15].

Електромагнітні витратоміри малоінерційні в порівнянні з витратомірами інших типів і практично незамінні в тих процесах автоматичного регулювання, де запізнення відіграє істотну роль, або при вимірі витрат, що швидко змінюються.

На показання електромагнітних витратомірів не впливають зважені в рідині частинки та бульбашки газу, осесиметрична (а в каналах спеціальної форми будь-яка) зміна профілю розподілу швидкостей потоку, а також фізико-хімічні властивості рідини, що вимірюється (в'язкість, щільність, температура тощо), якщо вони не змінюють її електропровідність [16].

Зазначені переваги та забезпечили досить широке поширення електромагнітних витратомірів, незважаючи на їхню відносну конструктивну складність та необхідність ретельного щоденного технічного догляду.

**Рис. 1** – Класифікація витратомірів за принципом виміру

**Рис. 2** – Методи вимірювання тиску (напору)

До основних факторів, що впливають на точність ультразвукових витратомірів можна віднести мінливість або неточність визначення товщини стінок трубопроводу, швидкості звуку в призмах, стінках трубопроводу і воді, епюри швидкостей води [17].

Незважаючи на це, ультразвукові витратоміри все ширше застосовують у нафтохімічній, харчовій та інших галузях промисловості, при гідравлічних дослідженнях та експлуатації обладнання.

Перевагами їх є: можливість безконтактного вимірювання будь-яких середовищ, у тому числі і неелектропровідних; досить висока точність приладів при їхньому індивідуаль-

ному градуюванні та використанні спеціальних засобів автокомпенсації найбільш істотних перешкод; висока надійність чутливих елементів (випромінювачів та приймачів ультразвукових коливань); висока швидкодія, що дозволяє вимірювати пульсуючі витрати з частотою пульсацій до 10 кГц.

Для вимірювання тиску в установках закритого типу застосовуються диференціальні датчики тиску. Відбір тиску здійснюється з верхнього та нижнього рівня установки. У відкритих ємностях вимір напору здійснюється рівнемірами поплавкового або акустичного типів.

На вибір ЗВ, що задовольняють усім вимогам точності вимірювань, впливають не тільки вищевикладені фактори, але й такі, як фірма-виробник, вартість ЗВ, гарантії виробника, а також номенклатура продукції, що випускається.

Зростання інтересу вітчизняних виробників вимірвальної техніки до внутрішніх потреб ринку призвело до появи широкої номенклатури ЗВ, що випускаються в Україні, а також розвиток міжнародного співробітництва, зокрема у галузі метрології та вимірвальної техніки, активну участь України в цьому процесі створили передумови для появи на її ринку сучасних зарубіжних засобів виміру.

Основними вітчизняними виробниками витратомірної техніки є: Сафір [18], НВП «Водомір» [19], НВП Ергомера [20].

Серед зарубіжних виробників можна відзначити такі відомі фірми як Krohne [21], Druck [22], Fisher-Rosemount Ltd. [23], PROline [24] та ін.

Основні метрологічні характеристики ЗВ показані у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики засобів вимірювання витрати рідини

Фірма виробник	Тип	Діапазон вимірювань	Діаметр трубопроводу D_y , мм	Клас точності	Приєднання	Температурний діапазон, °C
1	2	3	4	5	6	7
Електромагнітні витратоміри						
Krohne		$3 \cdot 10^{-5}$ - 27,8 м ³ /с	2,5-3000	0,3-0,5	Фланцеве, міжфланцеве.	-25 ÷ 140
PROline	Promag 50/53 P	$2 \cdot 10^{-4}$ - 11,3 м ³ /с	15-600	0,2-0,5	Фланцеве, міжфланцеве.	-25 ÷ 150
НВП «Водомір»	ЕРСВ-020		10-200	0,5	Фланцеве	-10 ÷ 150
НВП Ергомера	SKM-1	0,1-320	20-150	0,5	Фланцеве	-25 ÷ 150
Ультразвукові витратоміри						
Krohne		$3 \cdot 10^{-4}$ - 125 м ³ /с	25-3000	0,5	Фланцеве, зовнішнє	-50 ÷ 150
НВП «Водомір»	ІРКА	$5 \cdot 10^{-4}$ - 200 м ³ /с	40-5000	0,5-1	Зовнішнє	-25 ÷ 55
НВП Ергомера	Ергомера-125.01	$7,8 \cdot 10^{-4}$ - 35 м ³ /с	50-5000	0,5-1	Врізний, накладний	-15 ÷ 150
Вихрові витратоміри						
Krohne	VFM 3100 FT	$8 \cdot 10^{-4}$ - 0,5 м ³ /с	15-300	0,2-0,5	Фланцеве, міжфланцеве	-20 ÷ 430

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Диференціальні датчики тиску						
Krohne		Від 0...0,6 мбар до – 1...25 мбар	-	0,1	Врізний	-40 ÷ 180
Druck	DPI 615	0.007-70 МПа	-	0,1	Врізний	-10 ÷ 40
Сафір	Сафір-М	0-10 бар	-	0,15-0,4	Врізний	-30 ÷ 80
АТ НДІРА	Квант ДД1/5	0,06 кПа -16 МПа	-	0,25	Врізний	-10 ÷ 50
Fisher-Rosemount Ltd.	3095 MV	0-248 кПа	-	0,2	Врізний	-40 ÷ 85
Масові витратоміри						
Krohne		$2,5 \cdot 10^{-4}$ -360 т/год	10-100	0,15	Фланцеве	-25 ÷ 130
PROline	Promass 80/83	70 т/год	8-100	0,15/0,2	Фланцеве	-25 ÷ 150

Висновки

Серед електромагнітних витратомірів можна відзначити витратоміри фірми Krohne та PROline, які відповідають усім метрологічним вимогам.

Ультразвукові витратоміри мають схожі метрологічні властивості і можна розглядати як рівноцінні. Вибір ультразвукових ЗВ повинен визначатися способом градування конкретного ЗВ та вартісними показниками.

Вихрові (каріолісові) витратоміри фірми Krohne, незважаючи на їх хороші точнісні показники, застосовуються для вимірювання малих витрат, що обмежує їх використання для автоматизованого керування при великих витратах рідини.

Диференціальні датчики тиску як вітчизняних, так і зарубіжних виробників відрізняються високим класом точності та широким діапазоном вимірюваних тисків.

Представлені ЗВ внесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки, допущених до застосування в Україні, метрологічно забезпечені, за своїми характеристиками можуть використовуватись як основні або перевірочні засоби вимірювання напору, тиску та витрати рідини в інформаційно-вимірювальних комплексах систем автоматизованого керування енергоблоками теплових, атомних та гідралічних електростанцій.

Список використаних джерел:

1. МЭК 60193: Модельные приёмо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – Изд. 2. – 1999. – 567 с.
2. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.
3. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації / Г. С. Грінченко, С. М. Артюх, В. В. Грінченко, С. С. Негодів // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>
4. ДСТУ 4403:2005 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'ємної та масової витрати рідини й об'єму та маси рідини, що протікає по трубопроводу. – Режим доступу : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=60249. (дата звернення 15.04.2023).
5. Yoder J. Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma / J. Yoder // Control Magazine. – 2001. – Vol. 1. – P. 1–6.

6. Yoder J. Measuring a 1 % gain in a 4,5 billion dollars market / J. Yoder // *Flow Control*. – 2008. – Vol. 6. – P. 42–45.
7. МИ 3082-2007. Выбор методов и средств измерений расхода и количества потребляемого природного газа в зависимости от условий эксплуатации на узлах учета. Рекомендации ФГУП ВНИИР. – Казань : ВНИИР, 2007. – 39 с.
8. Пистун Е. П. Уточнение коэффициента истечения стандартных диафрагм расходомеров переменного перепада давления / Е. П. Пистун, Л. В. Лесовой // *Датчики и системы*. – 2005. – № 5. – С. 14–16.
9. An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas / D. E. Cristancho, K. R. Hall, L. A. Coy, G. A. Iglesias-Silva // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2010. – Vol. 21. – P. 299–301.
10. A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamic / M. A. Gomez-Osorio, D. O. Ortiz-Vega, I. D. Mantilla, H. Y. Acosta, J. C. Holste, K. R. Hall, G. A. Iglesias-Silva // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 33. – P. 197–201.
11. Buker O. Reynolds number dependence of an orifice plate / O. Buker, P. Lau, K. Tawackoli- an // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 30. – P. 123–132.
12. Nadeem M. Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls / M. Nadeem, H. J. Lee, J. Lee, H. J. Sung // *International Journal of Head and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 56. – P. 16–27.
13. De Marchis M. Numerical observations of turbulence structure modification in channel flow over 2D and 3D rough walls / M. De Marchis, B. Milici, E. Napoli // *International Journal of Head and Fluid Flow*. – 2015. – Vol. 56. – P. 108–123.
14. Пистун Е. П. Применение безвентильных блоков подсоединения дифманометров для устранения возможности искажения результатов измерений при учете энергоносителей / Е. П. Пистун, Р. Я. Дубиль // *Коммерческий учет энергоносителей*. – СПб. : Политехника, 2001. – С. 350–354.
15. Лепявко А. П. Средства измерений расхода жидкости и газа / А. П. Лепявко. – М. : АСМС, 2015. – 252 с.
16. Білінський Й. Й. Аналіз методів і засобів контролю витрат рідких і газоподібних середовищ та їхня класифікація / Й. Й. Білінський, М. О. Стасюк, М. В. Гладішевський // *Автоматика та інформаційно-вимірвальна техніка. Наукові праці ВНТУ*. – 2015. – № 1. – С. 1–11.
17. Народницький Г. Ю. О погрешности измерения расхода воды ультразвуковым накладным времяимпульсным расходомером Г. Ю. Народницький // *Украинский метрологический журнал*. – 2000. – Вып. 3. – С. 49–52.
18. Сафир, Сафир М. – датчики давления. – Режим доступа : <http://manometr.net.ua/Преобразователи-давления/Сафир-Сафир-М-датчики-давления.html?pop=0> (дата звернення 03.05.2023).
19. Водомер : сайт. – Режим доступа : www.vodomer.com.ua . (дата звернення 23.04.2023).
20. Научно-производственное предприятие «Эргомера» : сайт. – Режим доступа : <http://www.ergomera.dp.ua> . (дата звернення 10.05.2023).
21. Krohne. – Access mode : <https://ua.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters> . (Last accesses 11.05.2023).
22. Shanghai cixi Instrument CO., LTD. – Access mode : https://www.cxflowmeter.com/products/list_34_1.html?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioLVZS2BJGxtOpnOyJrrCG_b9arbFR5mR5mKZv4USjM38m97tQLIVMBoCy0UQAvD_BwE . (Last accesses 15.05.2023).
23. Emerson. – Access mode : <https://www.emerson.com/en-us/automation/rosemount> . (Last accesses 11.05.2023).
24. Endress+Hauser. – Access mode : www.endress.com . (Last accesses 11.05.2023).

Reference

1. Mezhdunarodna elektrotekhnichna komisiia, 1999. 60193 Modelnie pryëmo-sdatochnie yspitanyia hydraulycheskykh turbyn, nasosov hydroakkumulyruiushchykh stantsiy y nasos-turbyn, [*Model acceptance tests of hydraulic turbines, pumps of pumping stations and pump-turbines*].
2. Kaniuk, HI, Mezeria, AYU & Suk, YV 2016, *Metodi i modeli enerhosberehaiushcheho upravleniya enerhetycheskymy ustanovkamy elektrostantsiy*, [*Methods and models for energy-saving control of power plants*], Tochka, Kharkov.
3. Hrinchenko, HS, Artiukh, SM, Hrinchenko, VV & Nehodov, SS, 2022, 'Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahnostyky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii', [*Unification of methods for technical diagnostics of pipeline systems to ensure safe exploitation*], *Mashynobuduvannia*, iss. 29, Pp. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>
4. Nacional'nyj nauchnyj centr «Institut metrologii», 2005. DSTU 4403:2005 Metrolohiia. Derzhavna povirochna skhema dlia zasobiv vymiriuvannia ob`iemnoi ta masovoi vytraty ridyny y ob`iemu ta masy ridyny, shcho protikaie po truboprovodu, [*Metrology. State verification scheme for means of measuring the volume and mass flow rate of a liquid and the volume as well as mass of a liquid flowing through a pipeline*].
5. Yoder, J 2001, 'Go New-Tech or Stick with DP meters? Differential pressure flow users face the dilemma' *Control Magazine*, Vol. 1, Pp. 1–6.
6. Yoder, J 2008, 'Measuring a 1 % gain in a 4,5 billion dollars market' *Flow Control*, Vol. 6, Pp. 42–45.

7. Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut rashodometrii, 2007. MI 3082-2007 Vybor metodov i sredstv izmerenij rashoda i kolichestva potrebljaemogo prirodnogo gaza v zavisimosti ot uslovij jekspluatacii na uzlah ucheta, [Selecting methods and means for measuring the flow rate and quantity of consumed natural gas depending on the operating conditions at metering units. Recommendations of FGUP VNIIR], Kazan' : VNIIR.
8. Pistun, EP & Lesovoj, LV 2010, 'Utochnenie koeficienta istechenija standartnyh diafragm rashodomerov peremennogo perepada davlenija', [Clarification of the flow coefficient for standard variable differential pressure flowmeter diaphragms], Datchiki i sistemy, no 5, Pp. 14–16.
9. Cristancho, DE, Hall, KR, Coy, LA & Iglesias-Silva, GA 2010, 'An alternative formulation of the standard orifice equation for natural gas' *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 21, Pp. 299–301.
10. Gomez-Orsorio, MA, Ortiz-Vega, DO, Mantilla, ID, Acosta, HY, Holste, JC, Hall, KR & Iglesias-Silva, GA 2013, 'A formulation for the flow rate of a fluid passing through an orifice plate from the First Law of Thermodynamic' *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 33, Pp. 197–201.
11. Buker, O, Lau, P & Tawackolian, K 2013, 'Reynolds number dependence of an orifice plate' *Flow Measurement and Instrumentation*. Vol. 30, Pp. 123–132.
12. Nadeem, M, Lee, HJ, Lee, J & Sung, HJ 2015, 'Turbulent boundary layers over sparsely-spaced rod-roughened walls' *International Journal of Head and Fluid Flow*, Vol. 56, Pp. 16–27.
13. De Marchis, M, Milici, B & Napoli, E, 2015, 'Numerical observations of turbulence structure modification in channel flow over 2D and 3D rough walls' *International Journal of Head and Fluid Flow*, Vol. 56, Pp. 108–123.
14. Pistun, EP & Dubil', RJ 2001, 'Primenenie bezventil'nyh blokov podsoedinenija difmanometrov dlja ustraneniya vozmozhnosti iskazhenija rezul'tatov izmerenij pri uchete jenergonositelej', [Application of valve-less connection blocks of diphmanometers to eliminate the possibility of distortion of measurement results in energy consumption metering], in *Kommercheskij uchet jenergonositelej*, Politehnika, SPb., S. 350–354.
15. Lepjavko, AP 2015, *Sredstva izmerenij rashoda zhidkosti i gaza*, [Liquid and gas flow measurement instruments], ASMS, Moskva, 252 s.
16. Bilynskyi, YY, Stasiuk, MO & Hladyshevskiy, MV 2015, 'Analiz metodiv i zasobiv kontroliu vytrat ridkykh i hazopodibnykh seredovyshch ta yikhnia klasyfikatsiia', [Analysis of methods and means for controlling the flow of liquid and gaseous media and their classification], *Avtomatyka ta informatsiino-vymiriuvalna tekhnika. Naukovi pratsi VNTU*, no 1. S. 1–11.
17. Narodnickij, GJu 2000, 'O pogreshnosti izmereniya rashoda vody ul'trazvukovym nakladnym vremjaimpul'snym rashodomerom', [On the error of measuring water flow by the ultrasonic clamp-on time-pulse flowmeter by G. Y. Narodnitsky], *Ukrainskij metrologicheskij zhurnal*, iss. 3, Pp. 49–52.
18. Safir, Safir M. – datchiki davlenija, [pressure sensors], nd., viewed 03 May 2023, <<http://manometr.net.ua/Preobrazovateli-davlenija/Safir-Safir-M-datchiki-davlenija.html?pop=0>>
19. Vodomer , [Water gauge], nd, viewed 24 April 2023, <www.vodomer.com.ua>.
20. Nauchno-proizvodstvennoe predpriatie «Jergomera», [Research and Production Enterprise "Ergomera"], nd., viewed 10 May 2023, <<http://www.ergomera.dp.ua>> .
21. Krohne, nd., viewed 11 May 2023, <<https://ua.krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters>>.
22. Shanghai cixi Instrument CO., LTD, nd., viewed 15 May 2023, <https://www.cxflowmeter.com/products/list_34_1.html?gclid=CjwKCAjwgqejBhBAEiwAuWHioLVZS2BJGxtopnOyJrrCG_b9arbFR5mR5mKZv4USjM38m97tQLIVMBoCy0UQAvD_BwE>.
23. Emerson, nd., viewed 11 May 202, <<https://www.emerson.com/en-us/automation/rosemount>>.
24. Endress+Hauser, nd., viewed 11 May 2023, <www.endress.com>.

Стаття надійшла до редакції 24 травня 2023 року

DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-61-70

УДК 621.22.018.8

АНАЛІЗ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИКОРИСТАННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ГЕНЕРАТОРІВ НА МІНІ ГЕС

© Мезеря А.Ю., Придворов С.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

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

Придворов Сергій Сергійович (Pridvorov Serhii): 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.

У статті наведено результати аналізу якісних показників (аналіз техніко-економічних показників) використання різних типів генераторів на гідроелектростанціях малої потужності (до 800 кВт). Показано енергетичний потенціал малих та міні ГЕС України на малих річках та використання водотоків систем технічного водопостачання, а також першочерговий економічно доцільний та екологічно безпечний потенціал. Проведено аналіз техніко-економічних характеристик синхронних електродвигунів, асинхронних електродвигунів та електродвигунів постійного струму, що використовуються як генератори на ГЕС малої потужності. До таких показників відносяться: вартісні характеристики відповідного обладнання у розрізі встановленої потужності, масогабаритні показники та термін окупності при повноцінній роботі ГЕС (число годин використання встановленої потужності не менше 4000). Встановлено, що використання асинхронних електродвигунів з ємнісним збудженням як генератор є найбільш перспективним рішенням, так як підвищується стійкість роботи електроприводів механізмів і підвищується якість енергії, вирівнюється несиметрія лінійних і фазних напруг, не вносяться спотворень у форму кривої лінійних і фазних напруг, складних автоматичних систем синхронізації, не потрібний захист від коротких замикань, підвищується надійність експлуатації ГЕС. Встановлено, що недостатньо вивченим питанням у цьому напрямі можна віднести фізичні процеси самозбудження асинхронного генератора та процес самозбудження. Визначено недоліки використання різних типів генераторів та методи їх усунення. При розрахунку вартості генераторів було проведено аналіз вартісних показників обладнання основних провідних виробників України та низки зарубіжних фірм. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Наведено результати аналізу техніко-економічних характеристик різних типів генераторів, залежно від потужності. Показано критичну потужність, що визначає оптимальність вибору з точки зору економіки. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Наведено результати аналізу техніко-економічних характеристик різних типів генераторів, залежно від потужності. Показано критичну потужність, що визначає оптимальність вибору з точки зору економіки. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Наведено результати аналізу техніко-економічних характеристик різних типів генераторів, залежно від потужності. Показано критичну потужність, що визначає оптимальність вибору з точки зору економіки.

Ключові слова: міні ГЕС, електродвигун, електрогенератор, техніко-економічні характеристики, строк окупності, якісні показники.

Mezerya A.Y., Pridvorov S.S. Analysis of qualitative indicators of the use of different types of generators at mini HPP.

The article presents the results of the analysis of qualitative indicators (analysis of technical and economic indicators) of the use of various types of generators at low power hydroelectric power plants (up to 800 kW). The energy potential of small and mini HPPs of Ukraine on small rivers and the use of watercourses of technical water supply systems as well as the primary economically viable and environmentally safe potential are shown. The analysis of the technical and economic characteristics of synchronous electric motors, asynchronous electric motors and DC electric motors used as generators at low-power HPPs has been carried out. These indicators include the cost characteristics of the relevant equipment in terms of installed capacity, weight and size indicators and the payback period for the full operation of the HPP (the number of hours of use of the installed capacity is at least 4000). It has been established that the use of asynchronous electric motors with capacitive excitation as a generator is the most promising solution, since the stability of the operation of electric drives of mechanisms increases and the quality of energy increases, the asymmetry of linear and phase voltages is leveled, and distortions are not introduced into the shape of the curve of linear and phase voltages, there is no need to use complex automatic synchronization systems, protection against short circuits is not required, and the reliability of HPP operation is increased. It has been established that the physical processes of self-excitation of an asynchronous generator and the process of self-excitation can be attributed to an insufficiently studied issue in this direction. The disadvantages of using various types of generators and methods for their elimination are determined. This study focuses on the cost analysis of generators by examining the cost indicators of major manufacturers in Ukraine and several foreign companies. The prices of generators were determined by calculating the average value across different types and manufacturers. The research presents the results of an analysis of the technical and economic characteristics of various generator types based on their power ratings. Furthermore, the critical power threshold is identified, which determines the optimal selection of generators from an economic standpoint. The findings of this analysis provide valuable insights into the cost considerations and technical performance of generators, aiding in informed decision-making for optimal generator selection in terms of economic efficiency.

Keywords: mini HPP, electric motor, electric generator, technical and economic characteristics, payback period, indications. quality indicators.

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

В останні роки у всьому світі приділяється велика увага розвитку установок перетворення відновлюваних видів енергії на електричну, децентралізацію та створення самозабезпечених енергорайонів. При цьому аварії, катастрофічні за економічними збитками і навіть небезпечні з точки зору обороноздатності країни землетрусу мають локальні наслідки. Відновлюються сотні раніше необґрунтовано занедбаних міні ГЕС та будуються нові на гідротехнічних спорудах об'єктів неенергетичного призначення, до яких належать водонапірні вежі, зрошувальні системи сільського господарства, водокачки та ін.

Енергетичний потенціал малих та міні ГЕС України на малих річках оцінюється, без урахування мікро ГЕС (мГЕС) та використання водотоків систем технічного водопостачання, у 2300-2400 МВт (12,0-12,5 млрд. кВт·г), а першочерговий економічно доцільний та екологічно безпечний потенціал становить 600-700 МВт (3-7 млрд. кВт·год).

Виходячи з цього, Держкоменергозбереженням України було розроблено, а Верховною Радою України прийнято Закон України «Про альтернативні види рідкого та газового палива», в якому визначено правові, соціальні, економічні, екологічні та організовані принципи виробництва та споживання альтернативних видів рідкого та газового палива на основі залучення нетрадиційних джерел та видів енергетичної сировини.

Позитивним моментом є те, що вперше в Україні ухвалено законопроект, який на державному рівні сприяє розвитку використання нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії (НВІЕ). Підготовлено до ухвалення Верховною Радою України також і проект Закону України «Про альтернативні джерела енергії».

Потрібно узагальнення отриманого досвіду відновлення та експлуатації цих ГЕС. На мініГЕС та мГЕС потужністю до 800 кВт при роботі в потужних електроенергетичних системах (ЕЕС) з надійним зв'язком, найпростішим і найдешевшим є альтернативний варіант – використання насосів замість гідротурбін, а замість синхронних генераторів – асинхронні електродвигуни як генератори. Вони характеризуються більш простими експлуатаційними характеристиками, автоматизацією та захистом, мають високі надійнісні показники роботи електричного обладнання. Експлуатаційного персоналу потрібно менше та нижчої кваліфікації. Найменше простоїв у ремонті, що в результаті компенсує деяке зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) агрегатів ГЕС. Аналіз особливостей використання асинхронних генераторів на мГЕС і присвячена справжня робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше, до 60-х років минулого століття, у СНД було збудовано близько 10 000 мГЕС. На початку 80-х років працювало лише близько 1000 мГЕС. Багато хто з них вимагав капітального ремонту, реконструкції із заміною турбін, генераторів, трансформаторів, апаратури автоматичного управління [3, 4].

Останніми роками асинхронні генератори (АГ) дедалі ширше застосовуються для мікро ГЕС фірмами України, Німеччини, Великобританії, США, Японії та інших країн. Ці машини характеризуються простою і міцною конструкцією, малим числом робочих частин, що є, як правило, стандартними з великою гнучкістю в умовах повної автоматизації, надійністю в роботі відносно низькою вартістю, кращими, ніж у синхронних генераторів, масогабаритними показниками. Однак, АГ на міні та малих ГЕС з одиничною потужністю 100 кВт і вище, на сьогоднішній день застосовуються рідко, і питання це до кінця не вивчене.

Питанням удосконалення систем управління мГЕС присвячено велику кількість робіт. Велика увага приділяється удосконаленню ПД-регуляторів, що дозволяють підвищити якість регулювання, зокрема якість електроенергії, що виробляється, а саме, стабільність частоти електричного струму [5-8]. Удосконалюються математичні моделі систем регулювання гідрогенераторами (гідротурбінами) [9], а також моделі фізичних процесів, що протікають [10-12], що дозволяє враховувати різні фактори і підвищувати якість регулювання гідротурбін. Розробляються енергозберігаючі системи керування гідроагрегатами, що дає значний економічний ефект за рахунок зниження втрат енергії в режимах нормальної експлуатації [13] та системи прецизійного керування на основі вирішення зворотних завдань динаміки [14], що дозволяють значно підвищити якість регулювання гідроагрегатів (набір потужності, перехідні процеси і т.д.) і підвищити стабільність частоти струму, що виробляється [15]. Однак більшість наукових рішень спрямовані на гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. Однак більшість наукових рішень спрямовані на гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. Однак більшість наукових рішень спрямовані на

гідротурбіни великої та середньої потужності, і питання якості регулювання та оптимальний вибір обладнання для мГЕС залишаються актуальними. З цією метою розглянуто електродвигуни Харківського електромеханічного заводу ХЕМЗ, синхронні двигуни фірми Endress, синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС. синхронні двигуни серії ECC5 (Електроважмаш) та двигуни постійного струму. Здійснено аналіз якісних та кількісних характеристик різних типів двигунів з метою застосування їх у ролі генераторів на мГЕС.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз техніко-економічних характеристик електродвигунів різних типів, які можуть бути використані як генератори на міні- та мікроГЕС з метою визначення критерію оптимальності вибору типу.

Виклад основного матеріалу

Застосування асинхронних генераторів у складі автономного енергокомплексу обґрунтовано з таких причин:

- застосування асинхронних генераторів підвищує стійкість роботи електроприводів механізмів та підвищує якість енергії;
- асинхронні генератори вирівнюють несиметрію лінійних та фазних напруг, а також несиметрію струмів навантаження;
- асинхронні генератори при паралельній роботі з мережею не вносять спотворень у форму кривої лінійних і фазних напруг, а, навпаки, покращують її за рахунок демпфування зовнішніх гармонійних складових струму та напруги, створюваних насиченими дроселями, трансформаторами, перетворювачами на випрямлячах та тиристорах, ін;
- у разі паралельної роботи електроагрегатів із асинхронними генераторами відпадає необхідність застосування складних автоматичних систем синхронізації;
- асинхронні генератори не вимагають захисту від коротких замикань, тому що в цьому режимі він втрачає збудження, що рівносильне його відключенню від мережі;
- асинхронні генератори відрізняються простотою конструкції та надійністю в експлуатації.

При встановленні асинхронних генераторів на ГЕС, які працюють на досить потужну електроенергетичну систему, їхнє збудження забезпечується енергосистемою. Слід лише врахувати, що асинхронний генератор для своєї роботи вимагає частоту обертання на 2-3% вище за синхронну, при цьому ковзання в генераторному режимі:

$$S_s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0$$

теоретично може змінюватися в межах $0 > S > -\infty$. Однак на практиці висока швидкість неприпустима як за умов механічної міцності, так і з міркувань обмеження втрат.

Основною особливістю, яка підвищує вартість АГ, є необхідність встановлення батареї конденсаторів у разі високих вимог з боку системи до компенсації реактивної потужності (див. рис. 1).

Крім того, слід враховувати, що напруга асинхронного генератора змінюється від навантаження (на 18% від холостого ходу до повного навантаження). На рис. 2 показана зовнішня характеристика асинхронного генератора де значення напруги та потужності навантаження P дано у відносних одиницях.

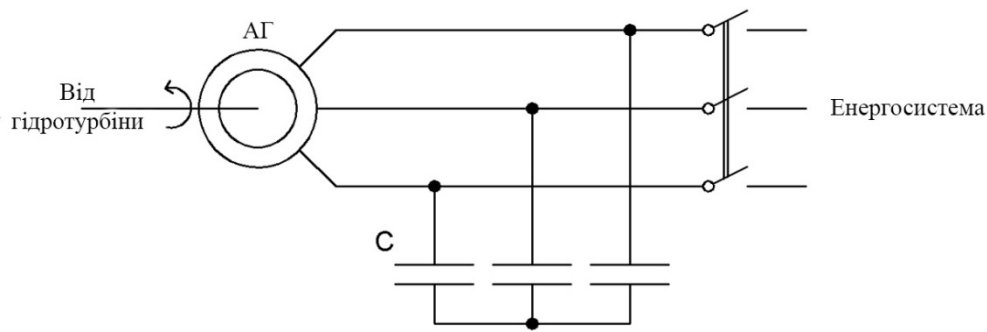


Рис. 1 – Схема конденсаторного збудження асинхронного генератора

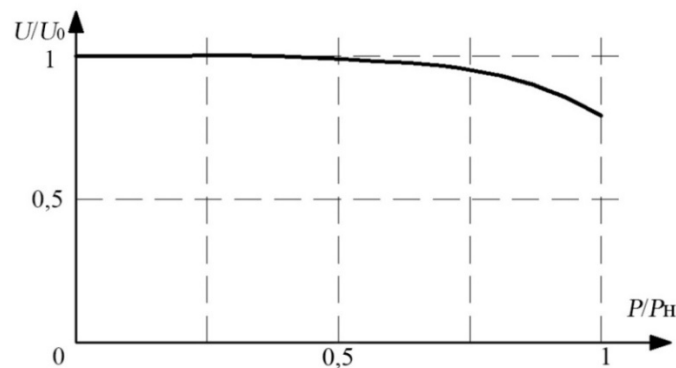


Рис. 2 – Зовнішня характеристика асинхронного генератора

Разом з тим АГ мають велику потужність самозбудження та ускладнюють регулювання вихідної напруги. Необхідну для утворення магнітного поля, що обертається, реактивну потужність асинхронний генератор споживає з мережі, навантажуючи додатковим реактивним струмом синхронні машини, які включені в мережу паралельно з ним. Це споживання реактивної потужності є основним недоліком асинхронних генераторів, що перешкоджає його поширенню.

Реактивна енергія для намагнічування, що використовується невеликими асинхронними генераторами, практично не обтяжлива для потужних ЕЕС. У ряді випадків при надмірній реактивній енергії (наприклад, при недовантажених довгих лініях повітряного зв'язку в системі) споживання її асинхронними двигунами навіть корисно. Якщо ЕЕС потребує компенсації, то встановлюється нерегульована або регульована батарея конденсаторів.

Щоб уникнути стрибків збільшення напруги при аварійному відключенні та розгоні асинхронних генераторів із підключеними конденсаторами, рекомендується:

- якщо мГЕС працює автономно, то під час пуску агрегату конденсатори (нерегульовані автоматично) вмикати до вимикача, а після прийняття навантаження перемикає у бік споживача (після вимикання);
- при схемі постійної роботи мГЕС в енергосистемі конденсатори повинні бути підключені з боку ЕЕС, тобто. після вимикачів генераторів.

До недостатньо вивчених питань можна віднести фізичні процеси самозбудження асинхронного генератора працюючого автономне навантаження, оскільки процес самозбудження залежить тільки від параметрів мережі, а й від конструктивних особливостей генератора.

Такий стан проблеми, швидше за все, пов'язаний з переважним використанням дотепер асинхронних машин як двигуна, з розробкою для нього теорії, розрахункових методик та проектування, а для генераторного режиму ці машини проектувалися досить

рідко. До того ж статичні конденсатори, які застосовуються як джерела реактивної потужності необхідної для процесу збудження, є дуже чутливими до значних змін напруги, що може призвести до виходу їх з ладу. Тому ще однією проблемою, що потребує вивчення, є дослідження аварійних режимів роботи асинхронних генераторів та розробка автоматичних систем регулювання для забезпечення заданих параметрів роботи МГЕС.

Протягом останніх років, як у нашій країні, так і за кордоном, теоретичні дослідження та практичний досвід показують перспективи застосування на малих та міні гідроелектростанціях самозбуджувальних асинхронних генераторів як автономні джерела електроенергії малої потужності (до 1000 кВт).

Застосування АГ тривалий час стримувалося в основному з двох причин: через відсутність малогабаритних силових конденсаторів, що забезпечують збудження генератора та компенсацію реактивної потужності навантаження, а також через складність стабілізації вихідної напруги.

На відміну від синхронних генераторів, які застосовуються на потужних ГЕС, асинхронні генератори не схильні до небезпек випадання з синхронізму. Однак асинхронні генератори не набули широкого поширення, що пояснюється рядом їх недоліків у порівнянні з синхронними генераторами.

Одним із суттєвих недоліків асинхронних генераторів є значна реактивна потужність, що споживається ними з мережі. Величина цієї потужності пропорційна намагнічує струм I_0 і може досягати 50% і більше від номінальної потужності машини [1]

З цього випливає, що для роботи 2-3 асинхронних генераторів необхідно використовувати один синхронний генератор такої потужності, що і потужність одного асинхронного генератора.

Якщо ж асинхронні генератори працюють паралельно загальну мережу з кількома синхронними генераторами, то велика величина реактивної потужності збудження асинхронних генераторів значно знизить коефіцієнт потужності всієї електричної мережі.

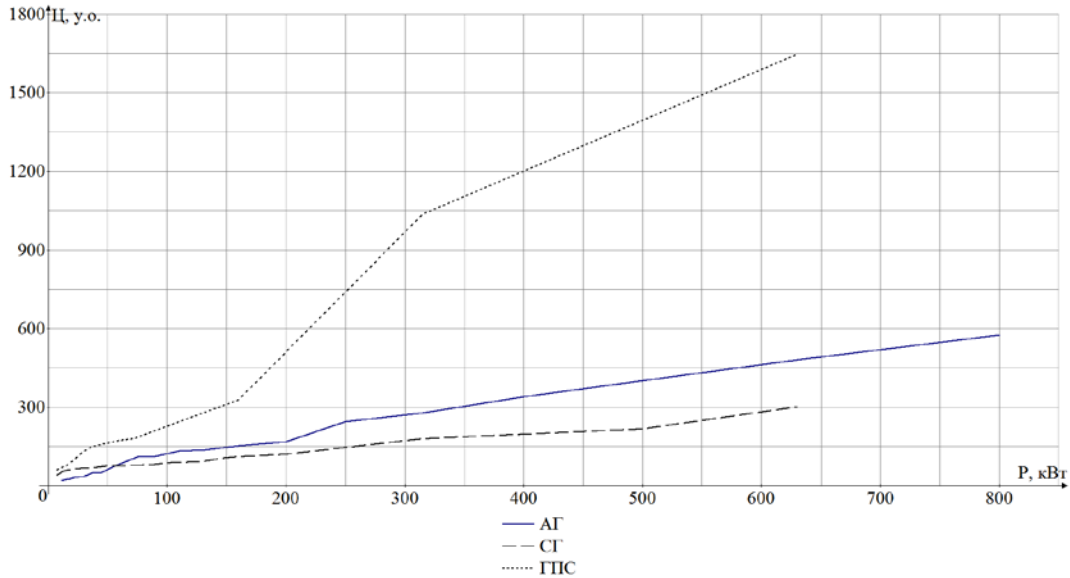
Асинхронний генератор може й автономних умовах, тобто. без включення до спільної мережі. Але в цьому випадку для отримання реактивної потужності, необхідної для намагнічування генератора, використовується батарея конденсаторів, що включені паралельно навантаженню на висновки генератора.

Поряд з технічними та експлуатаційними характеристиками генераторів, одним з основних критеріїв вибору типу генератора для гідроелектростанції малої потужності є також і вартісні показники генераторів та супутніх їх пристроїв (системи збудження та стабілізації напруги та частоти). Особливо це актуально при реконструкції, модернізації та відновленні існуючих, але перебувають в аварійному стані міні та малих ГЕС. Так як витрати на реконструкцію гідротехнічних споруд, будівлі станції та головної електричної схеми, практично не відрізняються і мало залежать від типу гідрогенератора, то вирішальним значенням при порівнянні техніко-економічних показників, буде вибір типу гідрогенератора (синхронний, асинхронний або генератор постійного струму) .

При розрахунку вартості генераторів було проведено аналіз вартісних показників обладнання основних провідних виробників України та низки зарубіжних фірм. Ціни на генератори визначалися шляхом знаходження середнього значення різних типів генераторів від різних виробників. Варто зауважити, що цінова політика різних виробників відрізняється в межах 3-5%, що робить нашу вибірку репрезентативною.

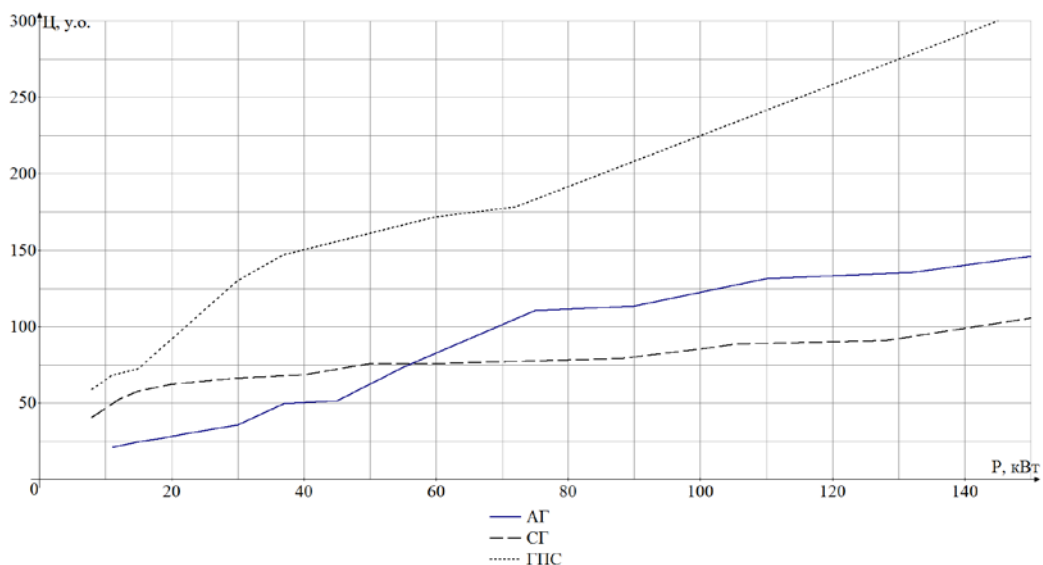
При розрахунку вартості враховувалися системи збудження синхронних генераторів (СГ), конденсаторні батареї асинхронних генераторів (АГ), необхідних для самозбудження, а також генератори постійного струму (ГПТ) без урахування інвертора, вартість якого становить залежно від типу та потужності близько 50% вартості ДПТ.

На рис. 3. представлена графічна залежність ринкової вартості генераторів різних типів залежно від своїх потужності. Ціна електричних машин вказана в умовних одиницях, де 1у.о.=2грн.

**Рис. 3 – Залежність вартості генераторів від їхньої потужності**

Аналіз цього економічного порівняння показує, що застосування ГПТ є найменш виправданим і підтверджується відсутністю даних генераторів на станціях типу, що розглядається. Особливо це буде проявлятися, якщо врахувати вартість інверторів та додаткових фільтрів, що згладжують для забезпечення необхідної якості електроенергії.

На рис. 4. показаний фрагмент вище наведеної залежності для діапазону малих потужностей. Звідси видно, що використання АГ економічно виправдане за потужності генератора ~50 кВт, за більшої потужності економічно виправдано СГ. У літературі найбільш доцільним з техніко-економічних міркувань рекомендується застосовувати асинхронні генератори потужністю трохи більше 20 кВт. На нашу думку дана різниця в потужностях АГ, рекомендованих до застосування пов'язана з тим, що останнім часом проблема з громіздкими і дорогими конденсаторами збудження відійшла на другий план, оскільки створені високоефективні плівкові конденсатори серії K78-17, що самовідновлюються, які за своїми техніко-економічними показниками перевершують конденсатори попередніх серій. Таке якісне поліпшення характеристик конденсаторів створило передумови для розширення сфери

**Рис. 4 – Фрагмент залежності вартості генераторів від їхньої потужності**

застосування АГ з конденсаторним самозбудженням. Даний графік підтверджує тенденцію використання АГ на вітроенергетичних установках, де за малих потужностей вітроагрегату АГ перевищують СГ за низкою техніко-економічних показів.

Характер залежності вартості генераторів від потужності пояснюється залежністю маси генераторів від потужності (див. рис. 5). На малих потужностях маси СГ більше, так як якір СГ цих потужностях більше ротора АГ через полюсності. На великих потужностях площа рамки РО АГ повинна бути великою для створення необхідного магнітного потоку, що забезпечує задану потужність. У зв'язку з цим розміри ротора АГ значно перевищують розміри якоря СГ, де такої залежності немає, а розмір машини визначаються струмами статора. Значення потужності, коли маси СГ і АГ рівні, становить близько 90 кВт.

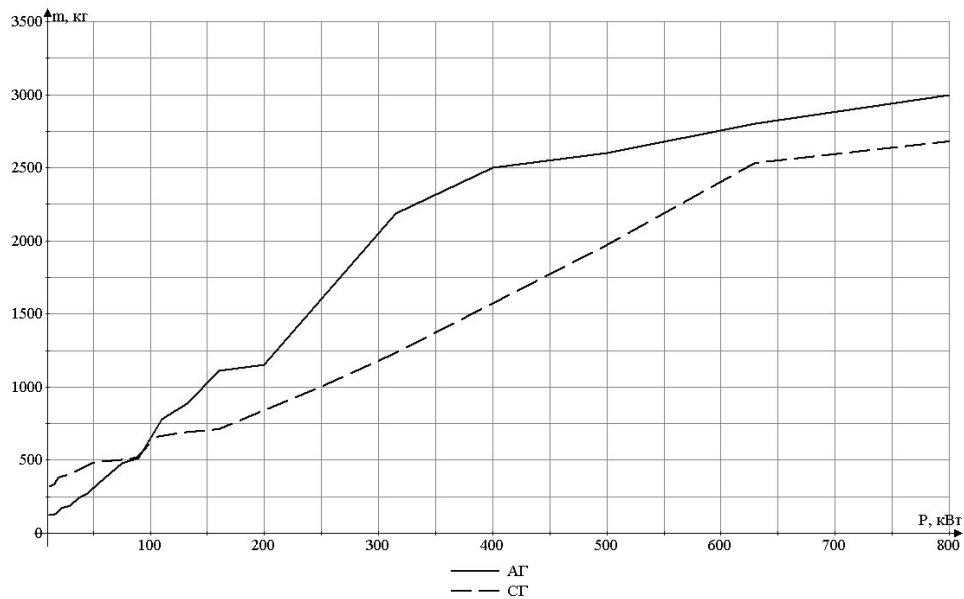


Рис. 5 – Залежність маси генераторів від їхньої потужності

Визначено орієнтовні терміни окупності для синхронних та асинхронних генераторів, показані на рис. 6.

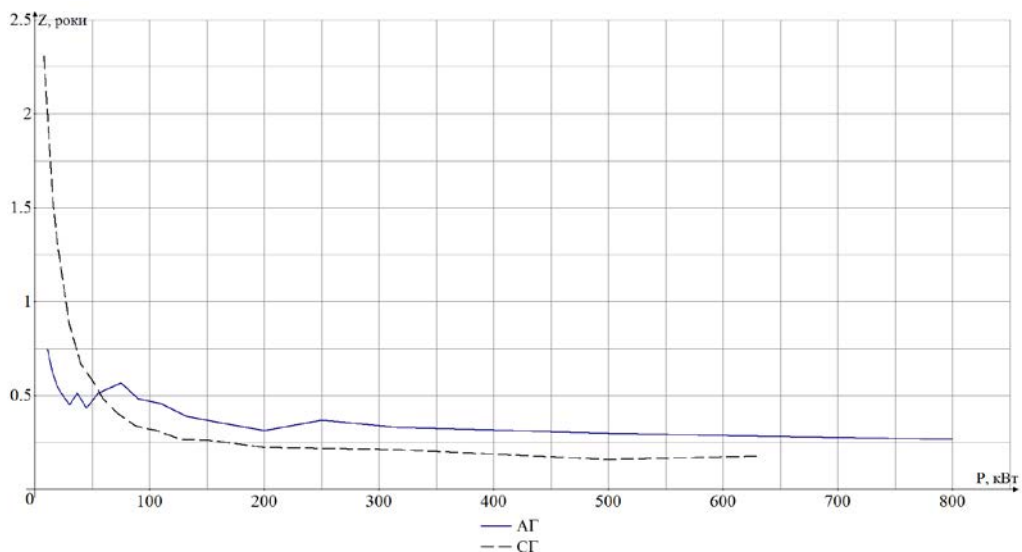


Рис. 6 – Термін окупності синхронних та асинхронних генераторів

Даний розрахунок носить суто економічний характер і не враховує технічних особливостей роботи АГ та СГ в автономному режимі та на мережу, що необхідно враховувати за повного техніко-економічного аналізу. Для остаточної відповіді на питання про доцільність застосування АГ для мГЕС необхідно провести повне порівняння технічних характеристик АГ і СГ у різних режимах роботи генераторів. Сюди відноситься зміна напруги та частоти на виході генератора при пульсаціях витрати та напору на мГЕС, а також при режимних змінах витрати. Це питання вимагає ретельного опрацювання, так як на мГЕС малої потужності може бути використаний спрощений регулятор, у зв'язку з чим точність підтримки частоти обертання гідроагрегату та його потужності нижче, ніж у великих ГЕС.

Висновки

Узагальнюючи результати проведеного аналізу можна відзначити, що питання використання асинхронних генераторів, або асинхронних двигунів як генератори на міні ГЕС, вимагають подальшого вивчення з детальним опрацюванням методик і теорій роботи АГ у нормальних, аварійних та перехідних режимах при автономній роботі та роботі на ЕЕС. Поряд з цим, у літературі відсутні чіткі рекомендації та критерії вибору типу генератора на мГЕС (синхронні або асинхронні) залежно від потужності та положення мГЕС в ЕЕС. Вирішення вищевказаних завдань дозволить підвищити техніко-економічні показники мГЕС, знизити капітальні витрати і собівартість електроенергії, що виробляється, що, зрештою, призведе до більш ефективного використання відновлюваних джерел енергії.

Вибір типу генератора, а отже і вартість капітальних вкладень, є визначальним при проектуванні, реконструкції та відновленні малих та мікро ГЕС.

Генератори постійного та їх системи стабілізації напруги та частоти є найбільш дорогими та є економічно невиправданими для застосування на малих та мікро ГЕС.

Використання АГ економічно виправдане за потужності генератора до ~50 кВт, за більшої потужності економічно виправдано СГ.

Значення потужності, коли маси СГ і АГ рівні, становить близько 90 кВт.

Список використаних джерел:

1. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1: Ветроэлектрогенераторы / В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац.аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»; Севастополь : Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.
2. Програма розвитку нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії та малої гідро- і теплоенергетики, складова частина Національної енергетичної програми України до 2010р. / Держкомененгрозбереження. – Київ, 1997.
3. Поярков М. Ф. Сельские электрические станции и подстанции. – М. : Гос. изд-во сельхоз. лит., 1954. – 400 с.
4. Малая гидроэнергетика / Л. П. Михайлов, Б. Н. Фельдман, Т. К. Марканова и др. – М. : Энергоиздат, 1989.
5. Ang K. H. PID control system analysis, design, and technology / Ang K. H., Chong G., Li Y. // IEEE Trans. on Control Syst. Tech. – 2005. – Vol. 13, № 4. – Pp. 559-576.
6. Лурье З. Я. Оптимизация параметров ПИД-регулятора системы управления частотой вращения ротора гидротурбины / З. Я. Лурье, В. Н. Дмитерко // Вестник НТУ «ХПИ». Энергетические и технологические процессы и оборудование. – 2003. – № 9.
7. Astrom K. J. Advanced PID control / Astrom K. J., Hagglund T. // ISA. The Instrumentation, System, and Automation Society. – 2006. – 460 p.
8. Li Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art / Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. Feb. – Pp. 41-54.
9. Жерняк А. П. Компьютерная система регулирования скорости гидротурбины / А. П. Жерняк, З. Я. Лурье, В. Н. Дмитерко // Вестник НТУ «ХПИ». Технологии в машиностроении. – 2001. – № 7.
10. Zwart P. J. Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics / Zwart P. J., Gerber A. G., Belamri T. A. // ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow (Yokohama, Japan, May 30 -June 3,2004). – Yokohama, 2004. – Paper No. 152.
11. Влияние колебаний напора на точность регулирования параметров гидротурбин / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Д. В. Ириков, В. Е. Мельников // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 3/2 (69). – С. 41-43.

12. Канюк Г. И. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. – Харьков : Точка, 2016. – 332 с.

13. Прецизионные системы энергосберегающего автоматического регулирования турбогенераторных установок электрических станций / Г. И. Канюк, Е. Н. Близниченко, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников, И. А. Бабенко. – Харьков : Точка, 2015. – 126 с.

14. 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.

Reference:

1. Krivcov, VS, Olejnikov, AM & Jakovlev AI 2003, *Neischerpaemaja jenergija. Kn. 1: Vetrojelektrogeneratory, [Inexhaustible Energy. Volume 1: Wind Power Generators]*, Nac.ajerokosm. un-t «Har'k. aviac. in-t», Sevast. nac. tehn. un-t, Har'kov, Sevastopol'.

2. Derzhkomenerhrozberezhennia 1997, *Prohrama rozvytku netradytsiinykh i vidnovliuvalnykh dzherel enerhii ta maloi hidro- i teploenerhetyky, skladova chastyna Natsionalnoi enerhetychnoi prohramy Ukrainy do 2010r.*, [The Program for the development of non-traditional and renewable energy sources and small hydro and thermal power, a component of the National Energy Program of Ukraine until 2010.], Kyiv.

3. Pojarkov, MF 1954, *Sel'skie jelektricheskie stancii i podstancii, [Rural power plants and substations]*, Gos. izd-vo sel'hoz. lit., Moskva.

4. Mihajlov, LP, Fel'dman, BN & Markanova, TK 1989, *Malaja gidrojenergetika, [Small hydropower]*, Jenergoizdat, Moskva.

5. Ang, KH & Chong, GLiY 2005, 'PID control system analysis. design and technology', *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.*, Vol.1, no. 4, Pp. 559-576.

6. Lurye, ZYa & Dmiterko, VN 2003, 'Optimizatsiya parametrov PID-regulyatora sistemy upravleniya chas-totoy vrashcheniya rotora gidroturbiny', [Optimization of PID parameters of the hydraulic turbine rotor speed control system], *Vestnik NTU «KhPI». Energeticheskiye i tekhnologicheskiye protsessy i oborudo-vaniye*, no 9.

7. Astrorn, KJ & Hagglund, T 2006, 'Advanced PID control' *ISA –The Instrumentation. Sysytem. and Automation Society*, 460 p.

8. Li, Y., Ang, KH & Chong, GCY 2006, 'Patents. Software. and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art' *IEEE Control Systems Magazine*, Feb, Pp. 41-54.

9. Zhernyak, AP, Lurye, ZY & Dmiterko, VN 2001, 'Kompyuternaya sistema regulirovaniya skorosti gidro-turbiny', [Computer-controlled hydraulic turbine speed control system], *Vestnik NTU «KhPI». Tekhnologii v mashi-nostroyenii*, no 7.

10. Zwart, PJ, Gerber, AG & Belamri, TA 2004, 'Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics' *ICMF 2004 In-ternational Conference on Multiphase Flow Yokohama. Japan. May 30 -June 3*, Paper no. 152.

11. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU, Irikov, DV & Melnikov, VE 2014, 'Vliyaniye kolebaniy napora na tochnost regulirovaniya parametrov gidroturbiny', [Influence of head fluctuations on the regulation accuracy of hydraulic turbines], *Skhidno-Evropeyskiy zhurnal peredovikh tekhnologiy*, no 3/2, Pp. 41-43.

12. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU & Suk, IV 2016, *Metody i modeli energosberegayushchego upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektro-stantsiy, [Methods and models for energy-saving control of power plants]*, Tochka, Kharkov.

13. Kanyuk, GI, Bliznichenko, EN, Mezerya, AYU, Melnikov, VE & Babenko, IA 2015, *Pretsizionnyye sistemy energosberegayushchego avtomaticheskogo regulirovaniya turbogene-ratornykh ustanovok elektricheskikh stantsiy, [Precision systems of energy-saving automatic control of turbine-generator units of power plants]*, Tochka, Kharkov.

14. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU & Melnikov, VE 2015, 'Pretsizionnyye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya gidroturbiny', [Precision automatic control systems], *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu “KhPI”. Seriya “Energetichni ta teplotekhnichni protsesi y ustatkuvannya”*, no 17, Pp. 91-96.

Стаття надійшла до редакції 14 червня 2023 року

DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79

УДК 621.22.018.8

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ АСУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ УТОЧНЕННЯ КРИТЕРІЯ ОПТИМАЛЬНОСТІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

© Грінченко Г.С., Василець Т.Ю., Купріянов О.В., Близниченко О.М., Фурсова Т.М.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Hrinchenko Hanna): ORCID: 0000-0002-6498-6142; e-mail: hrinchenko@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.

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

Купріянов Олександр (Kupriyanov Oleksandr): ORCID: 0000-0003-0017-5751, доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, проректор з наукової роботи, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Близниченко Олена Миколаївна (Bliznichenko Olena): ORCID: 0000-0002-2774-5200; e-mail: art-studio_diana_@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Фурсова Тетяна Миколаївна (Fursova Tetiana): ORCID: 0000-0003-1900-7432; e-mail: tatiana2507@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті проведено аналіз факторів, що впливають на техніко-економічні показники роботи енергоблоків електростанцій. На основі відхилення фактичних значень параметрів від оптимально-нормативних та проектних значень визначено коефіцієнти зміни витрати енергії стосовно витрат первинної енергії, а саме: обумовлений дією внутрішніх факторів; обумовлений дією зовнішніх факторів; обумовлений недосконалістю устаткування. Їх чисельне визначення базується на теплових розрахунках окремих елементів енергетичного обладнання при безперервно змінюваних параметрах, що характеризують перебіг процесів у цих елементах (температури, тиску, витрати та ін.). Показано, що при одночасному спалюванні декількох видів палива оптимально-нормативні параметри змінюються в залежності від кількісного співвідношення видів палив, що спалюються. Визначено сумарне відхилення витрати палива як сукупність змін у витратах палива, спричинених відхиленням фактичних значень параметрів від їх проектних величин. Враховано відповідно відхилення витрати палива за рахунок впливу аналізованих факторів парогенератора, турбіни, механізмів власних потреб блоку, асортименту палива та пусків, а також впливу зміни режимів роботи, кількості відпущеної енергії, фактичного асортименту палива, якості експлуатації, а також реальних умов роботи обладнання та якості проектування та монтажу. Отримано аналітичну залежність визначення різниці між фактичною замірною витратою палива та фактичною розрахунковою, яка характеризує величину небалансу. Визначено шляхи подальшого вдосконалення автоматизованих систем управління тепловими електростанціями, які полягають у зменшенні витрат палива, тепла та електроенергії на власні потреби. Наведено схему визначення фактичної розрахункової витрати пального нетто енергоблоком на основі розрахунку окремих аналізованих факторів, що дозволяє конкретно відповісти на питання: що, як і якою мірою впливає на загальні техніко-економічні показники енергоблоку. Використання наведених критеріїв в автоматизованих системах управління окремим обладнанням, енергоблоком та електростанцією в цілому дозволить підвищити якість систем керування.

Ключові слова: техніко-економічні показники, якість систем автоматизованого керування, енергоблок, електростанція, енергозбереження.

Hrinchenko H., Vasylets T., Kupriyanov O., Bliznichenko O., Fursova T. Improving the quality of ASC of thermal power plants by specifying the optimality criteria for technical and economic indicators.

The article analyzes the factors affecting the technical and economic indicators of the operation of power units of power plants. Based on the deviation of the actual values of the parameters from the optimal normative and design values, the coefficients of change of energy consumption relative to the consumption of primary energy are determined, namely: due to the action of internal factors; caused by external factors; caused by the imperfection of the equipment. Their numerical determination is based on thermal calculations of individual elements of power equipment with continuously changing parameters characterizing the course of processes in these elements (temperature, pressure, flow, etc.). It is shown that with the simultaneous burning of several types of fuel, the optimal normative parameters change depending on the quantitative ratio of the types of fuel being burned. The total deviation of fuel consumption is determined as a set of changes in fuel consumption caused by the deviation of the actual values of the parameters from their design values. Accordingly, the deviation of fuel consumption due to the influence of the analyzed factors of the steam generator, turbine, mechanisms of the unit's own needs, the range of fuel and starts, as well as the influence of changes in operating modes, the amount of energy released, the actual range of fuel, the quality of operation, as well as the real operating conditions of the equipment, its design and assembly quality, are taken into account. The analytical dependence of the determination of the difference between the actual measured fuel consumption and the actual estimated fuel consumption, which characterizes the amount of imbalance, was obtained. The ways of further improvement of the automated control systems of thermal power plants, which consist in reducing the consumption of fuel, heat and electricity for their own needs, were determined. The study presents a scheme for determining the actual estimated net fuel consumption of power units, utilizing a calculation method that takes into account various analyzed factors. The scheme enables addressing questions related to the factors that influence the overall technical and economic indicators of power units, including what aspects are influential, how they affect the indicators, and to what extent. Incorporating these criteria into automated control systems for individual equipment, power units, and entire power plants will enhance the quality of control systems. By utilizing the proposed scheme, improvements can be achieved in the efficiency and effectiveness of power unit operations, leading to enhanced technical and economic performance.

Keywords: technical and economic indicators, quality of automated control systems, power unit, power plant, energy saving.

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

В даний час очевиднішим стає факт взаємозв'язку енергозбереження, що забезпечує зниження витрати палива та енергії на одиницю продукції, що виробляється, з глобальною проблемою екології планети. Згідно з дослідженнями, проведеними наприкінці минулого століття, потенціал енергозбереження становить близько 1/3 всього обсягу споживаних первинних ресурсів. Витрата первинних енергоресурсів у розрахунку на одиницю валового внутрішнього продукту в нашій країні приблизно в 1,3 рази більша ніж у США, і в 2 рази вище порівняно з передовими західноєвропейськими країнами та Японією [1].

У нашій країні питання енергозбереження історично вирішуються і вирішуватимуться за двома глобальними напрямками:

- енергозбереження при генерації електричної та теплової енергії на електричних станціях;
- енергозбереження у сфері споживання енергії.

За першим напрямом ведуться і інтенсивно розвиватимуться дослідницькі, конструкторські та монтажні роботи з підвищення економічності діючих теплових (ТЕС) та атомних (АЕС) електростанцій, оскільки більша частина основного та допоміжного обладнання енергоблоків 200 і 300 МВт виробило свій ресурс (фізично та морально застаріло)), то з метою безпеки параметри пари та води в них знижено. Знижено потужність енергоблоків 200 МВт до 170-180 МВт, а енергоблоків 300 МВт до 280 МВт, тобто. вони експлуатуються у нерозрахункових, не економічних режимах. Це призвело до зниження їх коефіцієнтів корисної дії (ККД) на 4 та більше відсотків [2]. Таким чином, виникає необхідність вироблення універсального критерію оптимальності техніко-економічних показників роботи електростанцій, який би враховував усі фактори, що впливають на економічність. Цей критерій має бути використаний у системах автоматизованого керування енергоблоками, що підвищить якість керування та точність визначення основних ТЕП, тобто аналіз техніко-економічних показників (ТЕП) є одним із найважливіших функцій автоматизованих систем управління виробництвом (АСУП) ТЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання енергозбереження висвітлено в Основні положення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року [3] та отримали свій подальший розвиток у «Нова енергетична стратегія України до 2035 року» [4]

Найближчим часом долю неекономічних блоків в Україні доведеться вирішувати шляхом впровадження маловитратних, економічно чистих енерготехнологій [5] та модернізації існуючого обладнання з метою приведення їх ТЕП у межі допустимого [6]. Сюди відноситься переведення конденсаційних електростанцій (КЕС) в режим ТЕЦ, впровадження технологій спалювання низькосортних палив [7] та відповідна модернізація обладнання [8], вдосконалення низькопотенційних комплексів [9] і т.д.

Поряд з цим, велика увага приділяється оптимізації та моделюванню режимів роботи енергоуустаткування електростанцій, у тому числі оптимізації навантаження на ТЕС [10], що дуже впливає на ТЕП. Розглядаються соціальні та екологічні аспекти роботи ТЕС, що також має бути враховано щодо інтегральних показників ТЕП [11, 12]. Розробляються проекти нормативних документів щодо забезпечення енергоефективних режимів роботи елементів енергоблоків [13, 14].

Незважаючи на велику кількість робіт, спрямованих на підвищення ТЕП роботи енергоблоків електростанцій, загальний критерій оптимальності визначено у неявному вигляді. Так у [10] розглядається струм оптимум розподілу навантаження, без урахування інших факторів. У роботах [13, 14] пропонується як критерій оптимальності ТЕП технічна сторона, без урахування заробітних плат, амортизації, екології тощо. Зазначені недоліки вимагають уніфікації критерію оптимальності ТЕП та облік усіх факторів, що входять до розрахунку ТЕП.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення методики визначення та аналізу техніко-економічних показників теплових електростанцій з метою їх ефективного використання в автоматизованих системах управління енергоблоками та підвищення якості систем управління.

Виклад основного матеріалу

Для ліквідації принципових недоліків існуючих способів аналізу ТЕП ТЕС та отримання необхідної для АСУП інформації система автоматизованого аналізу має передбачати:

1) поділ всіх аналізованих факторів на внутрішні (залежні від персоналу електростанції) та зовнішні (не залежні від нього: режимний, об'ємний, зміна асортименту палива та ін.);

2) визначення нормативних показників до функцій від навантаження обладнання для реальних умов експлуатації та стану обладнання;

3) розрахунок оптимальних експлуатаційних параметрів з видачею необхідних рекомендацій усім категоріям працівників (від персоналу окремих робочих місць до керівництва електростанції) щодо підтримки оптимальних режимів роботи обладнання;

4) підготовку вихідних даних для визначення оптимальних обсягів ремонтних та реконструктивних робіт та проведення їх у оптимальні терміни;

5) підготовку вихідних даних з оцінки діяльності персоналу ТЕС загалом по оптимально-нормативному витраті палива, тобто. за такою витратою, яку електростанція могла б мати за відсутності причин перевитрати з вини її персоналу;

6) підготовку вихідних даних для кількісної оцінки діяльності різних груп персоналу щодо зон обслуговування установок та механізмів, на режим та параметри, яких безпосередньо впливає цей персонал.

Для поділу всіх аналізованих факторів на внутрішні та зовнішні та підготовки всіх необхідних вихідних даних у [2] запропоновано наступну класифікацію параметрів та відповідних показників:

- проектні параметри (показники) P_p ;
- фактичні параметри (показники) P_f ;
- оптимально-нормативні параметри (показники) P_n .

Проектні параметри - це параметри, які мали б місце, якби всі вихідні положення, що стали основою проектування (конструювання), повністю досягнуто в процесі експлуатації. Ці параметри закладаються на стадії конструювання обладнання та проектування електростанції. Фактичні параметри – це параметри, які реально мають місце на устаткуванні у процесі його експлуатації.

Різниця між фактичними та проектними параметрами

$$\Delta P_{f.p} = P_f - P_p \quad (1)$$

визначає загальну зміну ТЕП обладнання, викликане недосконалістю конструкції, недосконалістю експлуатації та відхиленням фактичних умов роботи від проектних. Для виділення впливу кожного з цих факторів, а також для визначення нормативних показників та оптимізації режимів роботи в реальних умовах експлуатації є оптимально-нормативні параметри.

Оптимально-нормативні параметри – це параметри, які були на обладнанні, якби за фактичних зовнішніх умов був відхилен через недосконалість експлуатації. Таким чином, різниця між фактичними та оптимально-нормативними параметрами

$$\Delta P_{f.n} = P_f - P_n \quad (2)$$

визначає зміну ТЕП через недосконалість експлуатації (внутрішні чинники). Оптимально-нормативні параметри мають визначатися відповідно до прийнятої методики.

Різниця між оптимально-нормативними та проектними показниками

$$\Delta P_{n.p} = P_n - P_p \quad (3)$$

визначає зміну ТЕП, викликане недосконалістю проектування (конструювання) та відхиленням фактичних умов роботи від проектних (зовнішні чинники).

Різниця між оптимально-нормативними показниками, визначеними для фактичних (P_n) та проектних (P_p) умов роботи обладнання за фактичного (непроектного) стану його,

$$\Delta P_{n.p} = P_n - P_p \quad (4)$$

дозволяє підрахувати зміну ТЕП через відхилення фактичних умов роботи від проектних.

Різниця

$$\Delta\Pi_{п.р} = \Pi_{п} - \Pi_{р} \quad (5)$$

дозволяє оцінити якість проектування та монтажу.

Таким чином, використання наведеної класифікації при аналізі економічності роботи обладнання та електростанції в цілому дає можливість кількісно оцінити вплив:

- 1) якості експлуатації ($\Delta\Pi_{ф.н}$);
- 2) відхилення реальних умов експлуатації від проектних ($\Delta\Pi_{н.п}$);
- 3) якості проектування та монтажу ($\Delta\Pi_{п.р}$).

Для визначення оптимально-нормативних величин усі параметри поділяються на три групи залежно від характеру їхнього впливу на витрату палива.

До першої групи включаються параметри, які не залежать від режиму роботи обладнання: $\Pi_1 \neq f_1(N)$. Як правило, вони або підтримуються постійними, або змінюються у певних, наперед заданих межах.

Другу групу утворюють параметри, які залежать тільки від режиму роботи обладнання та визначаються ним: $\Pi_2 \neq f_2(N)$. Вони є змінними величинами (температура газів, поживної води та ін.).

Третя група – це параметри, що залежать як від режиму роботи обладнання, так і від факторів, на які персонал електростанції безпосередньо впливати не може (наприклад, асортимент палива, що спалюється, температура охолоджуючої води та ін.): $\Pi_3 \neq f_3(N)$.

При визначенні оптимально-нормативних величин параметрів третьої групи необхідно, як правило, проводити розрахунки з оптимізації, оскільки в цьому випадку нормативна величина визначається із знаходження оптимального поєднання різних параметрів та умов роботи обладнання. Наприклад, оптимально-нормативна величина – вакууму може бути отримана тільки при визначенні сумарної максимальної потужності турбоагрегату та циркуляційних насосів в залежності від температури води, що охолоджує, при даному стані конденсатора. У цю групу включаються показники, що визначають надійність роботи установок.

При одночасному спалюванні декількох видів палива оптимально-нормативні параметри змінюються в залежності від кількісного співвідношення видів палив, що спалюються. Визначення таких параметрів здійснюється за виразом:

$$\Pi_i = \sum_k \delta_k \Pi_{ik} \quad (6)$$

де δ_k – частка спаленого k -го виду палива у загальних витратах (середня величина за аналізований період); Π_i і Π_{ik} , – будь-який показник, віднесений відповідно до суміші палива та k -му його виду.

На основі відхилення фактичних значень i -х параметрів від оптимально-нормативних та проектних значень $\Pi_{ін}$ і $\Pi_{пр}$ визначаються коефіцієнти зміни витрати енергії Φ_i , по відношенню до витрат первинної енергії:

- коефіцієнт зміни витрати енергії, зумовлений дією внутрішніх факторів:

$$\Phi_{iфн} = k_i \Delta\Pi_{iфн} \quad (7)$$

- коефіцієнт зміни витрати енергії, зумовлений дією зовнішніх факторів:

$$\Phi_{iфп} = k_i \Delta\Pi_{iфп} \quad (8)$$

- Коефіцієнт зміни витрати енергії, обумовлений недосконалістю обладнання:

$$\Phi_{\text{ипр}} = k_i \Delta \Pi_{\text{ипр}} \quad (9)$$

У цих виразах коефіцієнти k_i являють собою зміни потужності або витрати тепла на агрегат, викликані відхиленням i -х параметрів на одиницю при одиничних витратах електричної потужності або витраті тепла. Величини k_i є функцією навантажень, стану обладнання та теплової схеми та ін. Надалі називатимемо ці величини питомими параметричними коефіцієнтами. Чисельне визначення їх базується на теплових розрахунках окремих елементів енергетичного обладнання при безперервно змінюваних параметрах, що характеризують перебіг процесів у цих елементах (температури, тиску, витрати та ін.), і в загальному випадку є предметом самостійного дослідження.

Коефіцієнти зміни витрати енергії Φ_i з (7), (8) та (9) служать для визначення змін потужності ΔN_i ; витрати тепла ΔQ_i та палива ΔB_i викликаних впливом i -го аналізованого фактору:

$$\Delta N_i = \Phi_i^N N; \quad \Delta Q_i = \Phi_i^Q Q; \quad \Delta B_i = f(\Delta N_i, \Delta Q_i); \quad (10)$$

де N , Q – фактичне електричне або теплове навантаження агрегату (індекси при Φ_i показують вид енергії, до якого належить цей коефіцієнт).

Сукупність змін у витратах палива, викликаних відхиленням фактичних значень параметрів від їх проектних величин, дає змогу визначити сумарне відхилення витрат палива $\Delta B_{\text{фр}}$. Воно визначається за виразом:

$$\Delta B_{\text{фр}} = \sum \Delta B_i = \sum \Delta B_{ki} + \sum \Delta B_{Ti} + \sum \Delta B_{c.ni} + \sum \Delta B_{p.ж} + \sum \Delta B_{\text{э}} + \sum \Delta B_a + \sum \Delta B_{\text{п}}, \quad (11)$$

де $\sum \Delta B_{ki}$, $\sum \Delta B_{Ti}$, $\sum \Delta B_{c.ni}$, $\sum \Delta B_{p.ж}$, $\sum \Delta B_{\text{э}}$, $\sum \Delta B_a$, $\sum \Delta B_{\text{п}}$ – відповідно відхилення витрати палива за рахунок впливу аналізованих факторів парогенератора, турбіни, механізмів власних потреб блоку, режимного та об'ємного факторів, асортименту палива та пусків.

Режимний, об'ємний та асортиментний фактори визначають вплив зміни відповідно до режимів роботи, кількості відпущеної енергії та фактичного асортименту палива на економічність роботи обладнання.

Доданки $\sum \Delta B_{ki}$, $\sum \Delta B_{Ti}$, $\sum \Delta B_{c.ni}$ вирази (11), містять відхилення, що визначають вплив ні витрата палива, якості експлуатації ($\sum \Delta B'_{ki}$, $\sum \Delta B'_{Ti}$, $\sum \Delta B'_{c.ni}$), а також реальних умов роботи обладнання та якості проектування та монтажу – зовнішніх факторів ($\sum \Delta B''_{ki}$, $\sum \Delta B''_{Ti}$, $\sum \Delta B''_{c.ni}$):

$$\sum \Delta B_{ki} = \sum \Delta B'_{ki} + \sum \Delta B''_{ki}; \quad \sum \Delta B_{Ti} = \sum \Delta B'_{Ti} + \sum \Delta B''_{Ti}; \quad \sum \Delta B_{c.ni} = \sum \Delta B'_{c.ni} + \sum \Delta B''_{c.ni}$$

Фактичний розрахунковий $B_{\text{ф.р.}}$ та оптимально-нормативні витрати $B_{\text{н}}$ палива визначаються відповідно за формулами:

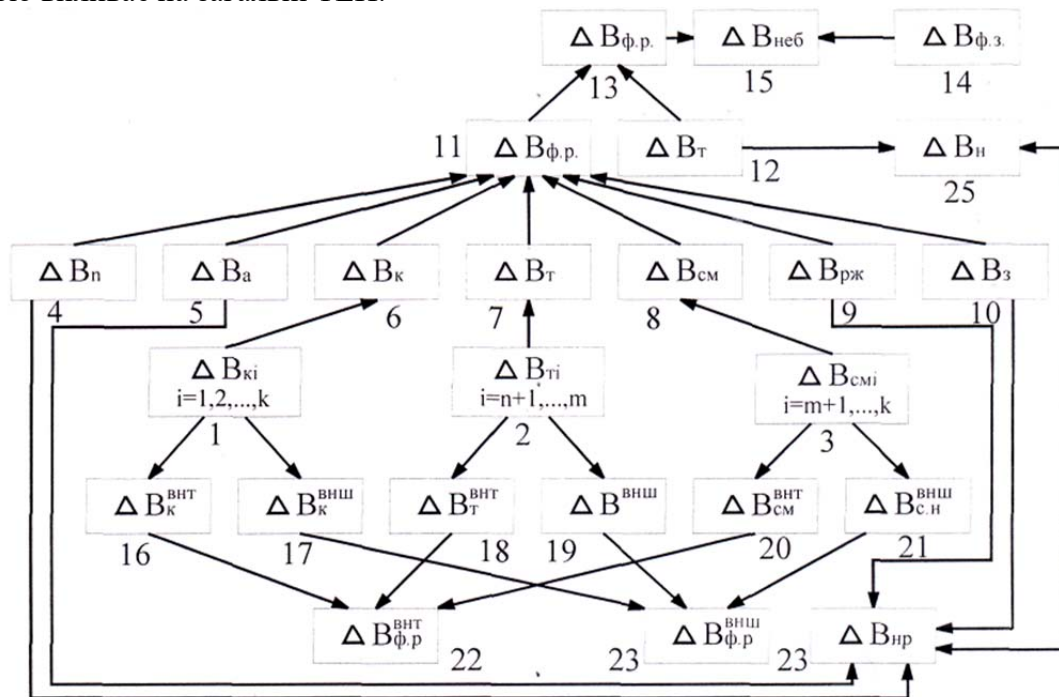
$$B_{\text{ф.р.}} = B_{\text{р.}} + \Delta B_{\text{ф.р.}} \quad (12)$$

$$B_{\text{н}} = B_{\text{р.}} + \Delta B_{\text{н.р.}}, \quad (13)$$

де $B_{\text{р.}}$ – проектний витрата палива, тобто. витрата, що визначається за проектних умов роботи обладнання та його проектному стані; $\Delta B_{\text{н.р.}}$ – відхилення витрати палива за рахунок впливу зовнішніх факторів:

$$\Delta B_{\text{HEB}} = B_{\text{f.z.}} + \Delta B_{\text{f.p.}}$$

Розподіл всіх чинників на внутрішні та зовнішні, яке використано у системі автоматизованого аналізу, дозволяє безпосередньо відповісти на питання: що, як і якою мірою впливає на загальні ТЕП.



Цифрами позначені: блоки розрахунків відхилень витрат палива за рахунок впливу відповідно: 1 – і-го фактору парогенератора; 2 – і-го фактору турбіни; 3 – і-го фактору механізмів власних потреб енергоблоку; 4 – пуску енергоблоку; 5 – асортимент палива, що спалюється; 6 - всіх аналізованих факторів парогенератора; 7 – всіх аналізованих факторів турбіни; 8 – всіх аналізованих факторів механізмів власних потреб енергоблоку; 9 – режимного фактору; 10 – об'ємного фактору; 11 – всіх факторів енергоблоку; 12 – проектний; 13 – фактичний розрахунковий; 14 – фактично вимірюваний; 15 – небаланс; 16 – внутрішніх факторів парогенератора; 17 – зовнішніх факторів парогенератора; 18 – внутрішніх факторів турбіни; 19 – зовнішніх факторів турбіни; 20 - внутрішніх факторів механізмів власних потреб енергоблоку; 21 – зовнішніх факторів механізмів власних потреб енергоблоку; 22 – внутрішні фактори енергоблоку; 23 - зовнішні фактори енергоблоку, пов'язані з недосконалістю проектування; 24 – всіх зовнішніх факторів енергоблоку; 25 – оптимально-нормативний; блоки формування сумарних відхилень витрат палива за рахунок впливу зовнішніх та внутрішніх факторів.

На основі викладених положень необхідна розробка та впровадження системи автоматизованого керування елементами електростанцій, яка дозволяє підтримувати оптимальні режими роботи обладнання та, таким чином:

- зменшити витрати тепла на турбоустановку;
- зменшити витрату палива на парогенератор;
- покращити ТЕП бруто окремих блоків та станції в цілому за будь-який період часу;
- зменшити витрати електроенергії на власні потреби по блоках, цехах та основних групах споживачів та розмірів їх відхилень від нормативних, включаючи оптимізацію окремих систем;
- підтримувати оптимально-нормативні показники всіх ланок ТЕС;
- враховувати вплив різних вартісних показників на собівартість енергії, прибуток та розрахункові витрати (ціна палива, заробітна плата, амортизація, поточний ремонт, капіталовкладення, сума реалізації та ін.).

Висновки

В результаті досліджень отримано залежності, що визначають фактичну розрахункову витрату палива нетто енергоблока на основі розрахунку окремих аналізованих факторів. Показано методику визначення фактичного відхилення витрати палива від розрахункового значення. Отримані взаємозв'язки чинників, що дозволяють безпосередньо з відповіддю: що, як і якою мірою впливає загальні техніко-економічні показники роботи енергоблока. Використання наведених критеріїв в АСУ ТЕС дозволить підвищити якість управління енергоблоками і знизити собівартість енергії, що виробляється.

Список використаних джерел:

1. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками тепловых и атомных станций. – Харьков : ЧП "КиК", 2006. – 420 с.
2. Артюх С. Ф. Автоматизированные системы управления энергогенерирующими установками электростанций. / С. Ф. Артюх, М. А. Дуэль, И. Г. Шелепов. – Харьков, 2000. – 447 с.
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. : втрата чинності 18.08.2017 р. / Каб. М-в України від 24.07.2013 р № 1071. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> (дата звернення 15.05.2023).
4. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (дата звернення 15.05.2023).
5. Халатов А. А. Энергетика Украины: текущий стан и ближайшие перспективы / А. А. Халатов // Вісник НАН України. – 2016. – № 6. – С. 53-61.
6. Шелепов И. Г. О некоторых проблемах оценки энергосбережения при эксплуатации устаревшего оборудования ТЭС / И. Г. Шелепов, Д. В. Михайский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № ½. – С. 173–175.
7. Підвищення точності виміру та контролю параметрів систем паливopодачі парових котлів електростанцій / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. М. Чеботарьов, Г. С. Близниченко, Ю. О. Бондаренко // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 80-88.
8. Модернизация режимов эксплуатации ТЭС с учетом качества топлива / И. Г. Шелепов, Д. В. Михайский, А. В. Павленко, О. В. Кедь // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 6/2. – С. 144-148.
9. Підвищення ефективності роботи систем низькопотенційного комплексу електростанцій шляхом оптимального керування витратою циркуляційної води / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. М. Чеботарьов, Г. С. Близниченко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2020. – Вип. 4(52). – С. 34–39.
10. Експериментальне моделювання процесів оптимізації навантаження на ТЕС / О. С. Сердюк // Управління економікою: теорія та практика : зб. наук. пр. – Київ : ІЕП НАНУ, 2018. – С. 213–227.
11. Дубовський С. В. Техніко-економічні оцінки перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України / С. В. Дубовський, В. С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 2(33). – С. 49–56.
12. Залознова Ю. С. Економічні та соціальні проблеми розвитку промисловості : монографія / Ю. С. Залознова ; НАН України, Інститут економіки промисловості. – Київ, 2017. – 288 с.

13. Князева В. Н. Анализ нормативных документов Украины по обеспечению эффективной эксплуатации элементов систем низкпотенциальных комплексов электростанций / В. Н. Князева, А. Ю. Мезеря, А. Н. Чеботарев // The 6th International scientific and practical conference “Topical issues of the development of modern science” (February 12-14, 2020). – Sofia : Publishing House “ACCENT”, 2020. – Pp. 553–557.

14. Чеботарьов А. М. Аналіз нормативного забезпечення ефективності роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій / А. М. Чеботарьов, Ю. О. Бондаренко // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 97–103.

Reference:

1. Dujel', MA 2006, *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya jenergeblokami teplovyh i atomnyh stancij*, [Automated control systems for power units of thermal and nuclear power plants], ChP "KiK", Har'kov.

2. Artjuh, SF, Dujel', MA & Shelepov, IG 2000, *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya jenerogenerirujushhimi ustanovkami jelektro-stancij*, [Automated control systems for power generating units of power plants], Har'kov.

3. Kabinet Ministriv Ukrainy 2013, Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 r. : vtrata chynnosti 18.08.2017 r., [Energy Strategy of Ukraine for the period up to 2030: expired on August 18, 2017], viewed 15 May 2023 <<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text>>.

4. Kabinet Ministriv Ukrainy 2017, Nova enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2035 roku: «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist», [New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, Energy Efficiency, Competitiveness"], viewed 15 May 2023 <<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>>.

5. Khalatov, AA 2016, 'Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan i naiblyzhchi perspektyvy', [Ukraine's energy sector: current situation and short-term prospects], Visnyk NAN Ukrainy, no 6, Pp. 53-61.

6. Shelepov, IG, Mikhayskiy, DV 2006, 'O nekotorykh problemakh otsenki energosberezheniya pri ekspluatatsii ustarevshego oboru-dovaniya TES', [On some problems of assessing energy savings in the operation of obsolete TPP equipment], Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, no 1/2, Pp. 173-175.

7. Kanyuk, GI, Mezerya. AYU, Chebotarov. AM, Bliznichenko. GS & Bondarenko, you 2022, 'Pidvishchennya tochnosti vimiru ta kontrolyu parametriv sistem palivopodachi parovikh kotliv elektrostantsiy', [Improving the accuracy of measurement and control of parameters for fuel supply systems of steam boilers at power plants], Mashinobuduvannya, iss. 29, Pp. 80-88.

8. Shelepov, IG, Mikhayskiy, DV & Ked, OV 2005, 'Modernizatsiya rezhimov ekspluatatsii TES s uchetom kachestva topliva', [Modernization of TPP operation modes taking into consideration fuel quality], Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, no 6/2, Pp. 144-148.

9. Kanyuk, GI, Mezerya, AYU, Chebotarov, AM & Bliznichenko, GS 2020, 'Pidvishchennya effektivnosti roboti sistem nizkopotentsiynogo kompleksu elektrostantsiy shlya-khom optimalnogo keruvannya vitratoyu tsirkulyatsiynoi vodi', [Improving the efficiency of low-potential power plant systems by optimizing circulating water consumption], Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi, iss 4(52), Pp. 34-39.

10. Serdyuk, OS 2018, 'Eksperimentalne modelyuvannya protsesiv optimizatsii navantazhennya na TES', [Experimental modeling of load optimization processes at TPPs], Upravlinnya ekonomikoyu: teoriya ta praktika, Pp. 213-227.

11. Dubovskiy, SV & Kobernik, VS 2013, 'Tekhniko-ekonomichni otsinki perspektivnikh prirodookhoronnikh tekhnologiy teplovoi energetiki Ukraïni', [Technical and economic assessments of promising environmental protection technologies in the thermal power industry of Ukraine], Problemi zagalnoi energetiki, no 2(33), Pp. 49-56.

12. Zaloznova, YuS 2017, Ekonomichni ta sotsialni problemi rozvitku promislivosti: monografiya, [Economic and social problems of industrial development: a monograph], NAN Ukraïni. Institut ekonomiki promislivosti, Kiïv.

13. Knyazeva, VN, Mezerya. AYU & Chebotarev, AN 2020, 'Analiz normativnykh dokumentov Ukrainy po obespecheniyu effektivnoy ekspluatatsii elementov sistem nizkopotentsialnykh kompleksov elektrostantsiy', [Analysis of regulatory documents of Ukraine to ensure the effective operation of elements in the systems of low-potential complexes of power plants], The 6th International scientific and practical conference “Topical issues of the development of modern science” (February 12-14. 2020), Publishing House “ACCENT”, Pp.553-557.

14. Chebotarov, AM & Bondarenko, YuO 2022, 'Analiz normativnogo zabezpechennya effektivnosti roboti elementiv sistem nizkopo-tentsiynikh kompleksiv elektrostantsiy', [Analysis of the regulatory support for the efficiency of system elements of low-potential power plant complexes], Mashinobuduvannya, iss 29, Pp. 97-103.

Стаття надійшла до редакції 14 червня 2023 року

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕТВОРЮВАННЯ ТЕПЛОТИ В РЕГЕНЕРАТИВНІЙ СИСТЕМІ ТУРБОУСТАНОВОК ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЇХ РОБОТИ

© Крамаренко Ю.О., Близниченко Г.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

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

У статті наведено удосконалений метод розрахунку параметрів теплової частини парових пар, який дає можливість оперативно з достатньою точністю оцінювати зміну ефективності перетворювання теплоти в турбоустановці в залежності від зміни режиму роботи або зміни в конструкціях окремих елементів схеми. Удосконалення дозволяє значно зменшити обсяг розрахункових операцій з визначення елемента, в якому сталося відхилення від розрахункового режиму роботи та втрата внаслідок цього. Суть удосконалення полягає в тому, що турбоустановка поділяється на окремі регенеративні ступені, кількість яких визначається числом регенеративних відборів. При цьому регенеративна ступінь складається з ряду послідовно (по ходу пари) включених елементів. Наведено рівняння теплового балансу при послідовності протікання технологічного процесу у регенеративній ступені, а також рівняння теплового балансу з урахуванням того, що в елементах регенеративної ступеня теплота витрачається не однаково для проточної частини, камери та паропроводу відбору, регенеративного підігрівача та дренажної системи. Наведено систему рівнянь, яка описує відносні величини розподілу потоків теплоти у кожному елементі регенеративної ступені. Отримані критерії, що характеризують ефективність перетворювання теплоти в елементах регенеративної ступеня та визначають якісні показники роботи турбіни, а саме: коефіцієнт корисної дії перетворювання теплоти у роботу, коефіцієнт втрат енергії в елементах регенеративної ступеня, коефіцієнти повертання теплоти. Удосконалено методику визначення збільшення витрати енергії в результаті технологічної відмови (часткової чи повної) шляхом порівняння фактичної витрати теплоти з еталонною. Наведено рівняння визначення внутрішнього коефіцієнта корисної дії турбоустановки з метою оцінки впливу змін у регенеративній мірі на роботу турбоустановки. Удосконалена методика дозволяє аналізувати стан елементів турбінних установок електростанцій як при експлуатації, так і при виборі оптимальних варіантів модернізації та в залежності від цього приймати міри з усунення технологічних відмов в енергоблоці та покращити показники якості роботи енергоблоків, а саме показники надійності та енергоефективності.

Ключові слова: техніко-економічні показники, показники якості, турбоустановка, енергоблок, електростанція, енергозбереження.

Kramarenko Y., Blyznychenko H. Assessment of the influence of the efficiency of heat conversion in the regenerative system of turbo installations of power plants on indicators of the quality of their work.

The article provides an improved method for calculating the parameters of the thermal part of steam vapors, which makes it possible to quickly and with sufficient accuracy evaluate the change in the efficiency of heat conversion in a turbine depending on a change in the operating mode or a change in the design of individual circuit elements. The improvement makes it possible to significantly reduce the volume of calculation operations for determining the element that deviated from the calculated mode of operation and losses as a result of this. The essence of the improvement is that the turbo installation is divided into separate regenerative stages, the number of which is determined by the number of regenerative selections. At the same time, the re-generative stage consists of a series of sequentially (pairwise) included elements. The heat balance equation for the sequence of the technological process in the regenerative stage is given, as well as the heat balance equation, taking into account the fact that in the elements of the regenerative stage heat is not consumed equally for the flow part, the chamber and steam pipeline of the selection, the regenerative heater and the drainage systems. A system of equations is presented that describes the relative values of heat flow distribution in each element of the regenerative stage. The obtained criteria characterize the efficiency of heat conversion in the elements of the regenerative stage and determine the quality indicators of the turbine operation, namely: the coefficient of the useful effect of the conversion of heat into work, the coefficient of energy losses in the elements of the regenerative stage, and the coefficients of heat return. The method of determining energy overspending as a result of a technological failure (partial or complete) by comparing the actual heat consumption with the reference one is given. The equation for determining the internal efficiency of a turbo installation is presented in order to assess the effect of changes in the regenerative degree on the operation of the turbo installation. The improved technique allows analyzing the condition of the elements of the turbine installations of power plants both during operation and when choosing the optimal modernization options and, depending on this, taking measures to eliminate technological failures in the power unit and improving the indicators of the quality of the power units, namely the indicators of reliability and energy efficiency.

Keywords: technical and economic indicators, quality of automated control systems, power unit, power plant, energy saving.

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

Теплоенергетика є базою енергетики як України, так і багатьох інших країн світу. Одним з основних обладнання є теплова турбіна, яка використовується на теплових та атомних електростанціях, парогазових установках, теплоелектроцентралях.

Ефективність роботи турбіни визначає показники якості роботи електростанції, до яких відноситься енергоефективність, що визначається такими характеристиками як коефіцієнт корисної дії (ККД), питома витрата палива, питома витрата пари.

Ефективність перетворення теплоти в окремих елементах турбоустановок електростанцій (ТЕУЕС) в даний час визначається шляхом громіздких обчислень [1], що ускладнює вживання оперативних заходів під час експлуатації енергоблоків електростанцій. Є великі складнощі щодо оптимізації термодинамічних та конструкційних параметрів в окремих елементах та діагностування їх стану. Тобто. необхідний метод, який давав би можливість оперативно і з достатньою точністю оцінювати зміну ефективності перетворення теплоти в турбоустановці в залежності від зміни режиму роботи або змін в конструкціях окремих елементів схеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Показники якості виробництва теплової та електричної енергії, до яких належить енергоефективність, відображені у основній стратегії розвитку енергетики України [2], а також в економічній політиці енергозбереження [3]. Визначено найближчі перспективи у цьому напрямі [4].

У зв'язку з цим, питанням підвищення якості роботи турбоустановок приділяється велика увага вчених та інженерів. Великий інтерес представляє оптимізація елементів турбоустановок, наприклад, проточних частин, що надає істотний внесок у ефективність її роботи [5]. Створюються серії нових турбін підвищеної потужності з використанням сучасних технологій і методик розрахунку [6], проводяться дослідження когенерації (спільне вироблення теплової та електричної енергії) [7], які відбилися на законодавчому рівні [8].

Істотний внесок у підвищення ефективності роботи турбоустановок роблять дослідження, спрямовані на оптимізацію режимів роботи турбін при їх автоматизованому керуванні [9, 10, 11] та вдосконалення регуляторів парових турбін [12, 13]. Розглядаються питання, пов'язані із проблемами забезпечення необхідного рівня енергозбереження застарілого обладнання [14] та продовження його ресурсу [15].

Ці та багато інших дослідження втілені в практику електростанцій та дозволили значно підвищити якість їх роботи, але питання оперативності та достатньої точності визначення ефективності перетворення теплоти в турбоустановці залежно від зміни режиму роботи або змін у конструкціях окремих елементів схеми, а також зміна цих параметрів у режимі реальної години, висвітлено недостатньо. Крім того, методика повинна бути простою, та гідною для реалізації в діючих системах керування енергоблоками без складної модернізації програмного забезпечення та апаратної складової. Зазначене потребує відповідного удосконалення розрахункових методик, чому й присвячена дана робота.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення методики визначення зміни ефективності перетворення теплоти в турбоустановці залежно від зміни режиму роботи або змін у конструкціях окремих елементів схеми.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до мети пропонується вдосконалений метод, який дозволяє значно скоротити обсяг розрахункових операцій з визначення елемента, в якому відбулося відхилення від розрахункового режиму роботи та збитки внаслідок цього.

Сутність удосконалення полягає в тому, що турбоустановка розчленовується на окремі регенеративні ступені (РС), кількість яких визначається кількістю регенеративних відборів [9]. При цьому регенеративний ступінь складається з ряду послідовно (по ходу пари) включених елементів (рис.1), а саме: проточної частини турбіни (ПТ), камери відбору (КО), паропроводу відбору (ТР), регенеративного підігрівача (П) та дренажного трубопроводу (ДР). Тобто у регенеративному ступені відбувається процес перетворення енергії пари від його початкового стану (n_0) до стану конденсату, що повертається в цикл (n'_{op}).

Зважаючи на послідовність протікання технологічного процесу в регенеративному ступені, для неї можна записати рівняння теплового балансу у вигляді:

$$q_{rc} = l_{rm} + q_{rn} + q_r^{63} + \Delta q_{rc}, \quad (1)$$

де $q_{rc} = \alpha_r (h_0 - h'_{rn})$ – теплота, підведена до пари даного регенеративного ступеня, кДж/кг;

$\alpha_r = \frac{D_r}{D_0}$ – відносна витрата пари з турбіни в даний ступінь;

h_0 – ентальпія гострої пари, кДж/кг;

h'_{rn} – ентальпія конденсату пари, що гріє, даного ступеня, кДж/кг;

$l_{rm} = \alpha_r (h_0 - h_r)$ – робота, що виконується пором α_r у проточній частині турбіни, кДж/кг;

$q_{rn} = \alpha_r (h_{rn} - h_r^{63})$ – теплота, передана в регенеративному підігрівачі, кДж/кг;

q_r^{63} – теплота, що повертається з конденсатом пари, що гріє, кДж/кг;

Δq_{rc} – теплота, що витрачається на покриття втрат у регенеративному ступені, кДж/кг.

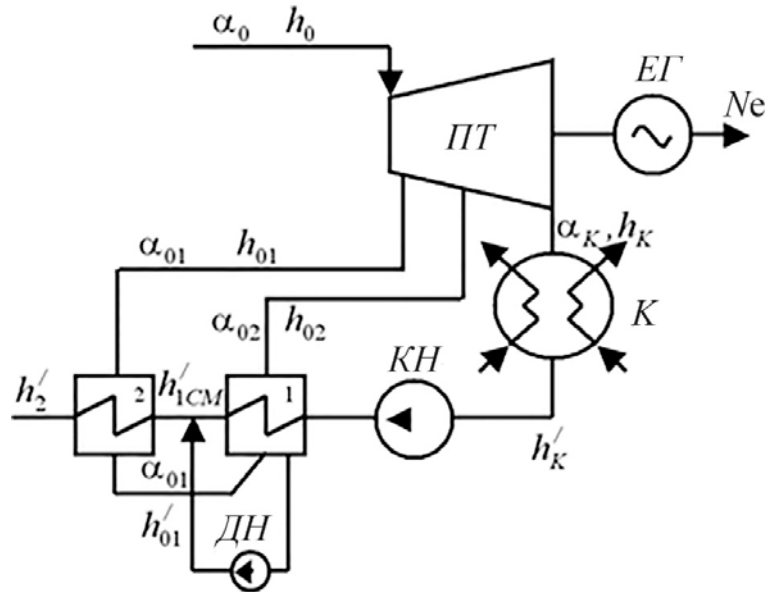


Рис. 1 – Спрощена теплова схема паротурбінної установки

Зважаючи на те, що в елементах регенеративного ступеня теплота витрачається не однаково, для проточної частини, камери та паропроводу відбору, регенеративного підігрівача та дренажів системи з урахуванням послідовності протікання пари, рівняння балансів можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} q_{rc} = l_{rm} + \Delta q_{rm} + q_{rm}^{63}, \\ q_{rm}^{63} = \Delta q_{ka} + q_{ko}^{63}, \\ q_{ko}^{63} = \Delta q_{mp} + q_{mp}^{63}, \\ q_{mp}^{63} = q_{rn} + \Delta q_{rn} + q_{rn}^{63}, \\ q_{rn}^{63} = \Delta q_{op} + q_{rc}^{63}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\Delta q_{rm}, \Delta q_{ko}, \Delta q_{mp}, \Delta q_{rn}, \Delta q_{op}$ – втрати енергії у відповідному елементі РС, кДж/кг;

$q_{rm}^{63}, q_{ko}^{63}, q_{mp}^{63}, q_{rn}^{63}, q_{rc}^{63}$ – потік теплоти на виході з відповідного елемента (тепла, що повертається), кДж/кг.

Систему рівнянь (2) можна виразити через відносні величини розподіл потоків теплоти в кожному елементі регенеративного ступеня. Для цього складові кожного рівняння необхідно розділити на ліву частину. З огляду на це систему можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} 1 = \eta_{rm} + \Delta \eta_{rm} + \gamma_{rm}^{63}, \\ 1 = \Delta \eta_{ka} + \gamma_{ko}^{63}, \\ 1 = \Delta \eta_{mp} + \gamma_{mp}^{63}, \\ 1 = \eta_{rn} + \Delta \eta_{rn} + \gamma_{rn}^{63}, \\ 1 = \Delta \eta_{op} + \gamma_{rc}^{63}, \end{cases} \quad (3)$$

У системі рівнянь (3) отримані критерії, що характеризують ефективність перетворення теплоти у кожному елементі регенеративного ступеня.

До них відносяться:

η_{rm} – абсолютний внутрішній ККД перетворення теплоти РС на роботу;

$\Delta\eta_{rm}, \Delta\eta_{ko}, \Delta\eta_{mp}, \Delta\eta_{rn}, \Delta\eta_{op}$ – коефіцієнти втрат енергії у відповідних елементах РС;

$\gamma_{rm}^{63}, \gamma_{rn}^{63}, \gamma_{rc}^{63}$ – коефіцієнти повернення теплоти з відповідного елемента,

$\eta_{mp} = \gamma_{mp}^{63}, \eta_{ko} = \gamma_{ko}^{63}$ – коефіцієнти повернення теплоти з камери відбору та паропроводу відповідні ККД даних елементів.

Систему рівнянь (2) з урахуванням (3) для будь-якого «i» ступеня, до якого підведена теплота q_{ic} , можна перетворити на вигляд:

$$\begin{cases} q_{ic} = q_{ic}(\eta_{im} + \Delta\eta_{im} + \gamma_{im}^{63}), \\ q_{rm}^{63} = q_{ic} \cdot \gamma_{im}^{63}(\Delta\eta_{ika} + \eta_{ika}), \\ q_{ko}^{63} = q_{ic} \cdot \gamma_{im}^{63} \cdot \eta_{ika}(\Delta\eta_{imp} + \eta_{imp}), \\ q_{mp}^{63} = q_{ic} \cdot \gamma_{im}^{63} \cdot \eta_{iko} \cdot \eta_{imp}(\eta_{in} + \Delta\eta_{in} + \gamma_{in}^{63}) \\ q_{rn}^{63} = q_{ic} \cdot \gamma_{im}^{63} \cdot \eta_{iko} \cdot \eta_{mp} \cdot \gamma_{in}^{63}(\Delta\eta_{op} + \gamma_{op}^{63}), \end{cases} \quad (4)$$

Рішення системи рівнянь (4) можна проводити в процесі експлуатації енергоблоків як ручним способом струму та за допомогою ЕОМ. Порушення процесів у будь-якому елементі призводить до зміни балансу енергії в даному елементі та в наступних за ними елементах регенеративного ступеня, що призводить до технологічної відмови (часткової або повної) [10]. Збільшення витрати енергії в результаті технологічної відмови можна визначати шляхом порівняння q_{ic}^0 фактичних витрат теплоти q_{ic} з еталонними, тобто:

$$\Delta q_{ic} = q_{ic} - q_{ic}^0. \quad (5)$$

Слід зазначити, що використання цього методу вимагатиме чіткої роботи датчиків, контрольно-вимірювальних приладів, які забезпечують інформацією ЕОМ. Шляхом спільного розв'язання рівнянь (4) і (5) можна знаходити джерело технологічної відмови в регенеративному ступені, або протитисковій турбіні [11].

Беручи до уваги те, що найбільш широке поширення в стаціонарних ТЕУЕС отримали турбоустановки з числом регенеративних щаблів $Z > 1$, необхідно оцінювати вплив часткової технологічної відмови в елементі «i» регенеративного ступеня «i» на ефективність роботи турбоустановки.

Для оцінки впливу змін у регенеративному ступені на роботу турбоустановки можна скористатися формулою для визначення абсолютного внутрішнього ККД турбоустановки [13]:

$$\eta_r = \frac{\sum_{i=1}^Z \overline{L_i} + \overline{L_K}}{Q_0} = \sum_{i=1}^Z \eta_i + \eta_K, \quad (6)$$

де: $\overline{L_i} = \alpha_i H_i, H_i = h_0 - h_i$ – повна та питома робота «i» потоку теплоти в турбоустановці, кДж/кг;

$\overline{L_K} = \alpha_K H_K, H_K = h_0 - h_K$ – теж, для конденсаційного потоку, кДж/кг;

$Q_0 = \sum_{i=1}^Z \alpha_i H_i + \alpha_K q_{Ko}$ у $q_{Ko} = h_0 - h_K'$ – повна та питома кількість теплоти (конденсаційного потоку), кДж/кг

h_0, h_i, h'_K – відповідно, ентальпії гострої та пари, що відбирається, і конденсату.

α_i – Відносні частки витрати пари в потоках, кДж/кг

$i = 1, 2, 3, \dots, Z$ – індекс, що кодує потік теплоти.

Z – кількість регенеративних відборів у турбоустановці.

η_i, η_K – відповідно, абсолютні внутрішні ККД «і» та «к» потоків теплоти в турбоустановці.

Значення η_i відрізняються тим, що η_{rT} характеризує частку потоку теплоти (Q_0), що використовується для отримання роботи в проточній частині, а η_{rT} (3) характеризує перетворення потоку теплоти q_{ic} . Залежність між η_i і η_{rT} має вигляд:

$$\eta_{rT} = \eta_i \frac{q_{ic}}{Q_0}. \quad (7)$$

З урахуванням (7) вираз (6) можна переписати у вигляді:

$$\eta_r = \sum_1^Z \eta_{rT} \frac{Q_0}{q_{ic}} + \eta_K. \quad (8)$$

Вираз (8) дає можливість аналізувати вплив ефективності окремих елементів регенеративної системи на основний показник якості роботи турбіни.

Висновки

Запропонована методика дозволяє аналізувати стан елементів схеми турбінних установок електростанцій як при експлуатації, так і при виборі оптимальних варіантів модернізації і в залежності від цього вживати заходів щодо усунення технологічних відмов в енергоблоці. Реалізацію методу доцільно здійснювати із застосуванням електронних обчислювальних машин та автоматизованих систем керування технологічним процесом, що дозволить проводити діагностування енергоблоків з метою підвищення його економічності та надійності.

Список використаних джерел:

1. Шелепов И. Г. Исследование влияния режимов работы НПК на эффективность работы энергоблока / И. Г. Шелепов, Д. В. Михайский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 3(2). – С. 122–125.
2. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/docscatalog/document?id=244996332> (дата звернення 20.04.2023)/
3. Оцінка енергетичної політики України у порівнянні з кращими європейськими практиками реалізації політики в 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 15.05.2023).
4. Халатов А. А. Энергетика Украины: сучасний стан і найближчі перспективи / А. А. Халатов. – Вісник НАН України. – 2016. – № 6. – С. 53–61.
5. Бойко А. В. Многокритериальная многопараметрическая оптимизация проточной части осевых турбин с учетом режимов эксплуатации : монография / А. В. Бойко, А. П. Усатый, А. С. Руденко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. – 220 с.
6. Створення парових турбін нового покоління потужністю 325 МВт / В. Г. Суботін, Є. В. Левченко, В. Л. Швецов, О. Л. Шубенко, А. О. Тарелін, В. П. Суботович. – Харків : Фоліо, 2009. – 256 с.
7. Черноволенко В. А. Когенерационные паровые турбины / В. А. Черноволенко, В. Н. Рябинин // Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. Техногенна безпека. – 2008. – Вип. 64, т. 77. – С. 126–130.
8. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії та використання скидного потенціалу» // Відомості Верховної Ради. – 2005. – № 20. – С. 275–285.
9. Дуэль М. А. Оптимальное управление теплоэнергетическими установками электростанций / М. А. Дуэль, Т. Л. Дуэль, И. Г. Шелепов. – Харьков : ЧП "КиК", 2000. – 308 с.
10. Дуэль М. А. Автоматизированные системы управления энергоблоками тепловых и атомных станций / М. А. Дуэль. – Харьков : ЧП "КиК", 2006. – 420 с.
11. Артюх С. Ф. Автоматизированные системы управления энергогенерирующими установками электростанций / С. Ф. Артюх, М. А. Дуэль, И. Г. Шелепов. – Харьков, 2000. – 447 с.

12. Прецизионные системы энергосберегающего автоматического регулирования турбогенераторных установок электрических станций / Г. И. Канюк, Е. Н. Близниченко, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников, И. А. Бабенко. – Харьков : Точка, 2015.

13. Унифицированная структура прецизионных быстродействующих систем энерго- и ресурсосберегающего автоматического управления и регулирования / Г. И. Канюк, И. А. Бабенко, А. Ю. Мезеря, М. Л. Козлова, И. В. Сук и др. // Проблемы машиностроения. – 2016. – № 2, т. 19. – С. 58–67.

14. Шелепов И. Г. О некоторых проблемах оценки энергосбережения при эксплуатации устаревшего оборудования ТЭС / И. Г. Шелепов, Д. В. Михайский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 1/2(19). – С. 173–175.

15. Продление ресурса теплоэнергетического оборудования энергоблоков АЭС / В. А. Кострыкин, И. Г. Шелепов, А. Л. Шубенко, И. А. Казак, Ю. А. Щербенко // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : сб. науч. трудов. – Харьков, 2003 – Т. 2. –С. 431–434.

Reference:

1. Shelepov, IG & Mihajskij, DV 2005, 'Issledovanie vliyaniya rezhimov raboty NPK na effektivnost raboty energobloka' [Studying the impact of NPC operating modes on the efficiency of a power unit], *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no 3(2), Pp. 122-125.

2. Kabinet Ministriv Ykrainy 2017, *Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku: «Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospro-mozhnist»* [New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, energy efficiency, competitiveness"], viewed 20 April 2023 <<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>>.

3. Vajs, D, Kalenborn, V, Brandl, G & Vajsa, D (ed) 2014, *Ocinka energetichnoyi politiki Ukrayini u porivnyanni z krashimi yevropejskimi praktikamirealizaciyi politiki v sferi energoefektivnosti ta vidnovlyuvanoyi energetiki* [Assessing Ukraine's energy policy in comparison with the best European practices of energy efficiency and renewable energy policy implementation], viewed 15 May 2023 <http://journal.esco.co.ua/esco/2015_3_4/log/art45.pdf>.

4. Halatov, AA 2016, 'Energetika Ukrayini: suchasnij stan i najblizhchi perspektivi' [Ukraine's energy sector: current state and immediate prospects], *Visnik NAN Ukrayini*, no 6, Pp. 53-61.

5. Bojko, AV, Usatyj, AP & Rudenko, AS 2014, *Mnogokriterial'naja mnogoparametricheskaja optimizacija protochnoj chasti osevyh turbin s uchetom rezhimov jekspluatacii* [Multicriteria multi-parametric optimization of axial turbines with regard to operating conditions], NTU «HPI», Har'kov.

6. Subotin, VG, Levchenko, YeV, Shvecov, VL, Shubenko, OL, Tarelin, AO & Subotovych, VP 2009, *Stvorenniya parovyh turbin novogo pokolinnya potuzhnisty 325 MVt* [Developing a new generation of 325 MW steam turbines], Folio, Harkiv.

7. Chernovolenko, VA & Ryabinin, VN 2008, 'Kogeneracionnye parovye turbiny' [Cogeneration steam turbines], *Tehnogenna bezpeka. Naukovi praci*, iss 64, vol. 77, Pp.126-130.

8. Verhovna Rada Ykrainy 2005, 'Zakon Ukrayini "Pro kombinovane virobnictvo teplovoyi ta elektrichnoyi energiyi ta vikoristannya skidnogo potencialu"' [On combined heat and power generation and using waste heat potential], *Vidomosti Verhovnoyi Radi*, no 20, Pp. 275–285.

9. Duel, MA, Duel, TL & Shelepov, IG 2000, *Optimalnoe upravlenie teploenergeticheskimi ustanovkami elektrostancij* [Optimal management of thermal power plants], ChP "KiK", Harkov.

10. Duel, MA 2006, *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya energoblokami teplovyh i atomnyh stancij* [Automated control systems for thermal and nuclear power units], ChP "KiK", Harkov.

11. Artyuh, SF, Duel, MA & Shelepov, IG 2000, *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya energogeneriruyushimi ustanovkami elektro-stancij* [Automated control systems for power generation units in power plants], Harkov.

12. Kanyuk, GI, Bliznichenko, EN, Mezerya, AYU, Melnikov, VE & Babenko, IA 2015, *Precizionnye sistemy energosberegayushego avtomaticheskogo regulirovaniya turbogenera-tornyh ustanovok elektricheskikh stancij* [Precision energy-saving automatic control systems for turbine generator sets in power plants], Tochka, Harkov.

13. Kanyuk, GI, Babenko, IA, Mezerya, AYU, Kozlova, ML & Suk, IV 2016, 'Unificirovannaya struktura precizionnyh bystrodeystvuyushih sistem energo- i resurso-sberegayushego avtomaticheskogo upravleniya i regulirovaniya' [A unified structure for high-precision, high-speed, energy- and resource-saving automatic control and regulation systems], *Problemy mashinostroeniya*, no 2, vol. 19, Pp. 58-67.

14. Shelepov, IG & Mihajskij, DV 2006, 'O nekotoryh problemah ocenki energosberezheniya pri ekspluatatsii ustarevshego oboru-dovaniya TES' [On some problems in assessing energy savings in the operation of obsolete TPP equipment], *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no 1/2(19), Pp. 173-175.

15. Kostykin, VA, Shelepov, IG, Shubenko, AL, Kazak, IA & Sherbenok, YuA 2003, 'Prodlenie resursa teploenergeticheskogo oborudovaniya energoblokov AES' [Extending the service life of thermal power equipment in nuclear power units], *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya*, vol. 2. Pp. 431-434.

DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-87-93

УДК 621.22.018.8

ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕВПОРЯДКОВАНOSTІ ІНФОРМАЦІЇ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

© Мезеря А.Ю., Дрозд В.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

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.

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.

Проведено аналіз впливу невідповідності інформації на показники якості (економічність та ефективність) систем автоматизованого керування енергоблоками електростанцій. Автоматизовані системи керування електростанцією, як і будь-якого складного об'єкта, розглядаються в роботі з позицій макропідходу як єдиний комплекс інформаційно взаємопов'язаних елементів, а ступінь ефективності автоматизованих систем керування розглядається з позиції статистичної фізики. Кількість інформації визначається згідно з існуючою теорією інформації, де міра невизначеності співпадає з поняттям термодинамічної ентропії. Встановлена залежність ефективності системи від невідповідності, та показано, що при збільшенні невідповідності ефективність системи знижується. Визначено причини появи невідповідності інформації, до яких відносяться неузгодженість потоків інформації, простий агрегатів, несвоєчасне надходження інформації та інше. Визначено залежності ускладнення системи керування на приріст ефективності та строк окупності додаткових капіталовкладень, який обернено залежить від невідповідності інформації. Визначена залежність вартості системи керування від ефективності керуючого комплексу. Встановлено, що на окремих рівнях керування необхідно прагнути до рівномірному рівню автоматизації, оскільки цей рівень характеризується однаковим строком окупності й однаковою величиною невідповідності. Показано, що ієрархічна структура керування в галузевому масштабі з передачею у вищі рівні меншого обсягу та більш загальну інформацію повністю себе виправдовує. Встановлено, що збільшення інформації системи керування не повинна перевищувати відомого, економічно доцільного рівня; не слід надмірно ускладнювати алгоритми керування; економічно доцільно залишати в керуваному комплексі частку невідповідності (шуму) тим більшу, чим складніший процес керування даним комплексом; після досягнення верхнього економічно доцільного рівня автоматизованого керування, тобто найбільшого економічно виправданого терміну окупності і, отже, вичерпання резервів, стає особливо актуальним перехід до нової, більш продуктивної технології АСК ТП, що забезпечує підвищене значення ефективності.

Ключові слова: техніко-економічні показники, показники якості, автоматизована система керування, енергозбереження, невідповідність інформації.

Mezerya A., Drozd V. Assessment of the influence of information disorder on quality indicators of automated control systems.

This study examines the impact of information disorder on quality indicators, specifically economy and efficiency, in automated control systems (ACS) of power units of power plants. The analysis focuses on power plant control systems as a complex entity consisting of informationally

interconnected elements, adopting a macro approach. The effectiveness of automated control systems is evaluated from the perspective of statistical physics. The research investigates the relationship between information disorder and quality indicators, particularly the cost dependence of the control system on the efficiency of the control complex. Findings reveal the importance of maintaining a uniform level of automation at individual management levels to ensure consistent payback periods and levels of irregularity. The study demonstrates the effectiveness of a hierarchical management structure on an industry scale, where higher levels receive more generalized information in smaller volumes. Furthermore, it establishes that the increase in information within the control system should remain economically feasible and not exceed a certain level. Control algorithms should be appropriately balanced, and a controlled amount of disorder (noise) within the complex is economically advantageous, particularly in more complex management processes. Upon reaching the upper economically justifiable level of automatic control and depletion of reserves, transitioning to a new, more productive technology in ACS becomes highly relevant, offering increased efficiency.

Keywords: technical and economic indicators, quality indicators, automated control system, energy savings, information disorder.

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

Протягом багатьох років питанням автоматизації збору та переробки техніко-економічної інформації в енергетиці не приділялося достатньої уваги, внаслідок чого ці завдання керування перебували у галузі великих значень невідповідності. Розробка простих методів визначення невідповідності та виявлення основних джерел "шуму" на основі результатів статистичних спостережень за простими обладнання при аварійних ситуаціях або з інших причин; "пролежуванням" запасів матеріалів та невикористаною інформацією; коливаннями якості продукції і т.п. факторами дозволить використовувати наявні потенційні резерви підвищення ефективності системи керування енергообладнанням. Принесе також безперечну користь та розвиток способів оцінки загальної кількості інформації, необхідної для керування енергообладнанням, а також оцінки вартості одиниці інформації в системі керування для можливості об'єктивного порівняльного аналізу розроблюваних та експлуатованих систем керування в енергетиці та підвищення, зрештою, якості систем керування та якості підтримки технологічних процесів (точність керування). Широке впровадження систем автоматизації та підвищення вимог до енергозбереження призвело до значного збільшення інформації та загострило питання її невідповідності. Останнє, у свою чергу, призводить до ускладнення систем керування, зниження їх точності та швидкодії, а також до зниження показників якості самих систем керування, до яких належить економічність. Вирішення подібних завдань для створюваних систем автоматизованого (автоматичного) керування обладнанням електростанцій є безперечно актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У новій енергетичній Стратегії України на період до 2035 року [1] особлива увага приділяється питанням енергозбереження та ресурсозбереження. Головним методом Стратегії є розробка та впровадження наукових методів та технічних рішень щодо конкурентоспроможності вітчизняної енергетики, яка базується, головним чином, на теплових та атомних електростанціях.

У цьому напрямку розробляються та удосконалюються сучасні алгоритми для систем керування [2], які дозволяють більш повно використовувати отриману інформацію. Йде розвиток у напрямку впровадження дисплейного керування [3], розробляються концептуальні основи створення сучасних автоматизованих систем керування [4]. З методом покращення використання інформації розробляються та удосконалюються математичні

моделі технологічних процесів [5], які використовуються не тільки в системах керування, а й у системах діагностики [6], що є також дуже важливим напрямком енергоефективності. Проводяться дослідження актуальних питань роботи операторів електростанцій. Так у [7] визначено труднощі, що виникають при роботі операторів в аварійних ситуаціях. Це тим більш актуально в умовах збільшення обсягу інформації та її невпорядкованості. Існують оцінки економічної ефективності систем керування енергоблоків [8], де показано, що питання невпорядкованості інформації є актуальним та своєчасним. Крім цього, застаріваюче обладнання електростанцій загострює цю проблему [9]. Це пов'язано з необхідністю отримання додаткової інформації в режимі експлуатації з метою забезпечення необхідного рівня надійності та безпеки. Але в науковій літературі недостатньо висвітлено питання впливу невпорядкованості інформації на показники якості систем керування, до яких, насамперед, належить економічність.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз впливу невпорядкованості інформації на показники якості (вартість та ефективність) систем автоматизованого керування енергоблоками електростанцій та визначення оптимального співвідношення між ними.

Виклад основного матеріалу

Автоматизовані системи керування електростанцією (АСК ЕС), як і будь-якого складного об'єкта, можна розглядати з позицій макропідходу як єдиний комплекс інформаційно взаємопов'язаних елементів. Ці елементи у процесі функціонування АСК безперервно перебувають під впливом різноманітних внутрішніх та зовнішніх чинників, що мають випадковий характер. Тому рівень ефективності АСК ЕС цілком закономірно розглядати з позицій статистичної фізики.

Зі статистичної фізики відомо, що для систем, що складаються з великої кількості елементів, є співвідношення

$$H = a \cdot \ln B, \quad (1)$$

де H – ентропія, a – постійна, B – невпорядкованість системи, упорядкованість системи $A = 1/B$.

Чим більше елементів включає керований комплекс, тим паче справедливо йому вираз (1). Відомо, що ентропія системи, наданої собі, зростає; інакше кажучи, у природних умовах зростає її невпорядкованість, тобто. система прагне безладдя. Протистояти наростанню безладдя можуть лише процеси керування. Процес керування – це сутнісно боротьба з невпорядкованістю. Але процес керування пов'язаний із переробкою та використанням інформації.

У теорії інформації міра невизначеності зіставляється термодинамічного поняття ентропії, а кількість інформації дорівнює зменшенню цієї невизначеності. Тоді з (1) знаходимо:

$$I = H_* - H = a \ln \frac{B_*}{B} \quad (2)$$

і

$$B = B_* e^{-I/a} \quad (3)$$

де I – кількість "керуючої" інформації, B_* – невпорядкованість, що відповідає ентропії H_* .

Невпорядкованість комплексу призводить до неповного використання його ефективності. Тому можна вважати, що ефективність комплексу:

$$E = E_{\max} [1 - f(B)] \quad (4)$$

де $E_{\max}$ – ефективність комплексу, що ідеально працює, $f(B)$ – деяка функція. Приймемо, що $f(B) = cB^d$, що охоплює дуже різноманітні випадки. Тут c і d – постійні.

Тоді отримаємо:

$$E = E_{\text{макс}}(1 - cB \cdot de^{-Id/a}).$$

Позначаючи $cB \cdot d = B_0$ і $a/d = I_0$, знайдемо:

$$E = E_{\text{макс}}(1 - B_0 e^{-I/I_0}), \quad (5)$$

де B_0 – "ефективна" неупорядкованість комплексу при його вихідному стані.

Вираз (5) вийшов таким самим, як і у випадку, якщо $f(B)=B$. Тому можна відкинути вираз "ефективна" і величину B_0 називати просто неупорядкованістю комплексу при його вихідному стані. Неупорядкованість керованого комплексу будемо визначати як міру відхилення його стану від ідеального, що забезпечує гранично можливе досягнення мети.

Залежно від джерела неупорядкованості має різне математичне вираз, але завжди $B < 1$. Наприклад, виявляється пропорційним величині математичного очікування щодо часу простоїв обладнання.

Для керованого комплексу неупорядкованість є широким поняттям. Вона залежить від неузгодженості потоків матеріалів та енергії, простою агрегатів, несвоєчасності надходження інформації та інших причин, що знижують ефективність керованого комплексу.

З (5) видно, що залежність ефективності керованого комплексу кількості керуючої інформації виражається експонентою (рис. 1).

Звернемося до виразу (5). Ефективність комплексу є широким поняттям: це може бути продуктивність або дохід підприємства, галузі; це може бути якість продукції, оскільки вона еквівалентна її кількості; це може бути ступінь виконання стратегічного завдання тощо. Приймемо для наочності, що ефективність E характеризує річний прибуток підприємства (грн/рік). Вважатимемо, що вартість системи керування, що реалізує збір та перетворення керуючої інформації, пропорційна кількості інформації. Через K (грн) позначимо вартість системи керування. Тоді вираз (5) набуде вигляду:

$$E = E_{\text{макс}}(1 - B_0 e^{-K/K_0}). \quad (6)$$

Ускладнення системи керування, що з додатковим капіталовкладенням dK , дає приріст ефективності комплексу dE .

Термін окупності додаткових капіталовкладень $T_{\text{ок}} = \frac{dK}{dE}$ Тоді з (6), враховуючи, що $B = B_0 \exp(-K/K_0)$ і що при $T_{\text{ок}}, K=0$, знаходимо:

$$T_{\text{ок}} = T_{\text{ок}0} \frac{B_0}{B}, \quad (7)$$

де $T_{\text{ок}}$ – термін окупності додаткових коштів, вкладених при вихідному стані комплексу, тобто за його неупорядкованості B_0 (рис. 2)

З (7) очевидно, що термін окупності обернено пропорційний неупорядкованості B .

Вирази (5) і (7) дозволяють зробити низку основних висновків.

1. У міру ускладнення системи керування, збільшення обсягу керуючої інформації та її "деталізації" придбана додаткова ефективність зменшується і термін окупності системи зростає. Тому "деталізація" системи керування має перевищувати відомого, економічно обґрунтованого рівня.

2. З цієї причини не слід надмірно ускладнювати алгоритми керування в гонитві за максимальною досконалістю. Наближені, але простіші алгоритми забезпечують більш економічну та надійну систему керування зі скороченою тривалістю її підготовки та освоєння. Це саме стосується і складання математичних моделей керованих комплексів. Слід будувати наближені моделі, що відбивають основні особливості комплексів, і основі створювати системи керування.

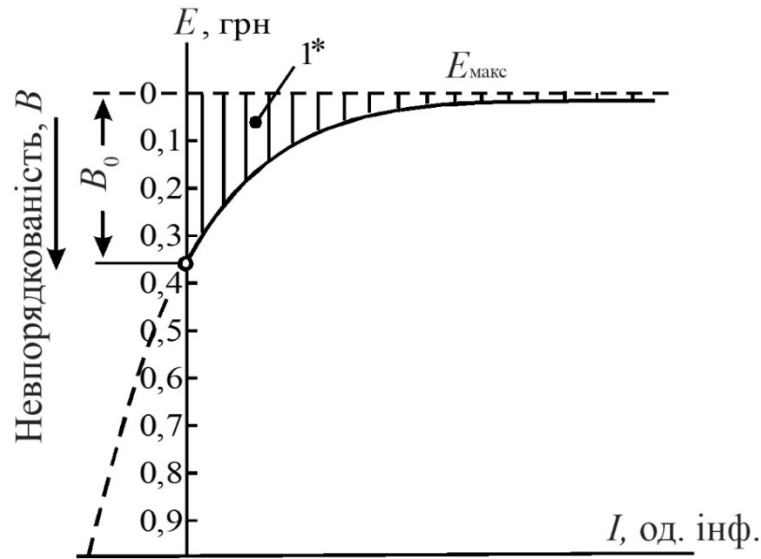


Рис. 1 – Залежність ефективності керуючого комплексу від кількості керуючої інформації
 I – кількість керуючої інформації, E – ефективність керованого комплексу,
 1^* – втрати від невпорядкованості, од. інф.

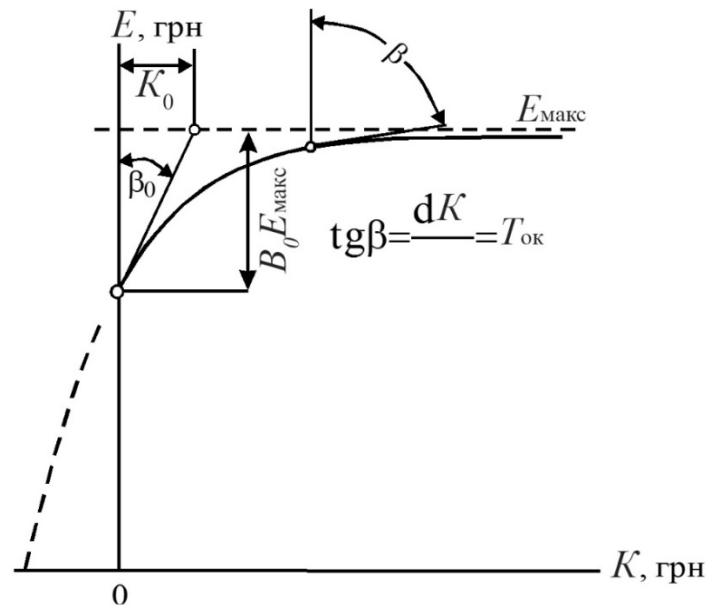


Рис. 2 – Залежність вартості системи керування від її ефективності
 K – вартість системи керування, грн., E – ефективність керованого комплексу, грн.

3. Економічно доцільно залишати в керованому комплексі частку невпорядкованості (шуму) тим більшу, що складніший процес керування цим комплексом. Як правило, що вище за ієрархічною драбиною керування виникає "шум", тим нижче його частоти. Вони можуть лежати в межах від кількох періодів на хвилину (виробничий агрегат) до кількох періодів на рік (підприємство, галузь). Кожному рівню відповідає свій робочий діапазон частот і, отже, свої прийоми та засоби придушення "шуму". Надмірно висока частота керуючих імпульсів на верхніх рівнях, як і зайва низька на нижніх, здатна повністю засмутити процес керування. Найбільш економічні системи керування, побудовані за ієрархічним принципом з різним характером придушення "шуму" різних рівнях.

Висловлені міркування підтверджують прийняту методологію створення АСК ЕС, де використовується кілька ієрархічних рівнів керування в галузевому масштабі з передачею у рівні вище дедалі меншого обсягу, але більш узагальненої інформації. Крім того, в міру можливості, реалізується тенденція переведення відповідного нижнього рівня на саморегулювання.

На окремих рівнях керування, як випливає з виразів (5) і (7), необхідно прагнути рівномірного рівня автоматизації, оскільки цей рівень характеризується однаковим терміном окупності та приблизно однаковою величиною невпорядкованості.

Після досягнення верхнього економічно доцільного рівня автоматичного керування, тобто найбільшого економічно виправданого терміну окупності ($T_{ок} = T_{ок.макс}$) і, отже, вичерпання резервів, стає особливо актуальним перехід до нової, продуктивнішої технології АСК ТП, що забезпечує підвищене значення $E_{макс}$.

При новій технології через невивченість процесу можна використовувати лише щодо проста система керування. Тому при переході до нової експоненти (рис. 3) характерна точка зміститься вліво. У міру вивчення процесу та вдосконалення системи керування точка почне переміщатися експонентом вправо, аж до кривої $T_{ок} = T_{ок.макс}$. Потім усе повториться. Мабуть, технічний прогрес у автоматизації керування енерговиробництвом можна ілюструвати зигзагоподібною кривою на рис. 3.

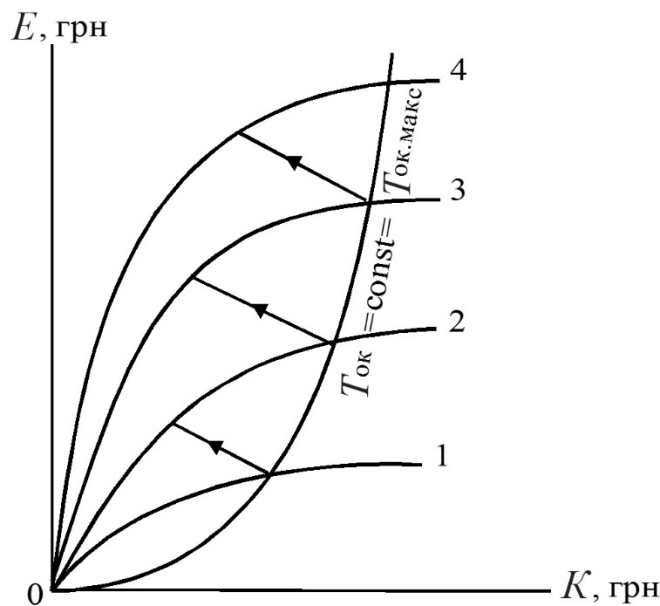


Рис. 3 – Крива прогресу

K – вартість системи керування, грн, E – ефективність керованого комплексу, грн,
1–4 – експоненти, що відповідають дедалі ефективнішим технологіям.

Висновки

Проведено дослідження впливу невпорядкованості інформації на показники якості систем керування. Встановлено вплив обсягу інформації та її невпорядкованості на вартість систем керування та її ефективність. Отримані залежності дозволяють зробити наступні висновки:

1. Збільшення інформації (деталізація) системи керування не повинно перевищувати відомого, економічно обґрунтованого рівня;
2. Не слід надмірно ускладнювати алгоритми керування;
3. Економічно доцільно залишати в керованому комплексі частку невпорядкованості (шуму) тим більшу, що складніший процес керування цим комплексом.

4. Після досягнення верхнього економічно доцільного рівня автоматичного керування, тобто найбільшого економічно виправданого терміну окупності і, отже, вичерпання резервів, стає особливо актуальним перехід до нової, продуктивнішої технології АСК ТП, що забезпечує підвищене значення ефективності.

Список використаних джерел:

1. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». – Режим доступу : <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332> (дата звернення 01 червня 2023)/
2. Дуэль М. А. Алгоритмическое обеспечение автоматизированных систем управления энергоблоками электростанций / М. А. Дуэль. – Харьков : Знание, 2000. – 283 с.
3. 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. 20–25.
4. Концептуальные основы построения АСТД энергоблоков АЭС Украины / В. А. Антонович, О. Ю. Черноусенко, Г. Н. Елизаренко и др. // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 3, – С. 18–24; № 2. – С. 25–29.
5. Демченко В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС / В. А. Демченко. – Одесса : Астропринт, 2001. – 308 с.
6. Диагностирование состояния и условий эксплуатации энергооборудования ТЭС и АЭС / М. А. Дуэль, А. Л. Дуэль, В. А. Кострыкин и др. – Харьков : ЧП «КиК», 2006. – 284 с.
7. Центр технической поддержки операторов в аварийных ситуациях энергоблоков №1 и №2 Хмельницкой и №3 и №4 Ровенской АЭС // Энергетика и электрификация. – 2010. – № 12. – С. 12–32.
8. Дуэль Т. Л. Экономическая эффективность АСУ энергоблоками / Т. Л. Дуэль // Труды ИпМАШ НАН Украины. – Харьков, 2000. – С. 156–161.
9. Шелепов И. Г. О некоторых проблемах оценки энергосбережения при эксплуатации устаревшего оборудования ТЭС / И. Г. Шелепов, Д. В. Михайский // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – 1/2(19). – С. 173–175.

Reference:

1. Kabinet Ministriv Ykrainy 2017, *Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku: «Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospro-mozhnist»* [New Energy Strategy of Ukraine until 2035: "Security, energy efficiency, competitiveness".], viewed 01 June 2023 <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>.
2. Duel, MA 2000, *Algoritmicheskoe obespechenie avtomatizirovannyh sistem upravleniya energoblokami elektrostancij*, [Algorithmic support for automated control systems for power plant units], Znanie, Harkov.
3. Aleksandrov, EV, Gorelik, AH & Rozenbaum, ID 2010, 'Displejnoe upravlenie v ASU TP atomnyh elektrostancij' [Display control in nuclear power plant APCs], *Energetika i elektrofikaciya*, no 12, Pp. 20–25.
4. Antonovich, VA, Chernousenko, OYu, Elizarenko, GN 2005, 'Konceptualnye osnovy postroeniya ASTD energoblokov AES Ukrainy' [Conceptual framework for building ASTD of Ukrainian NPP power units], *Energetika i elektrofikaciya*, no 3, Pp.18–24, no 2, Pp .25–29.
5. Demchenko, VA 2001, *Avtomatizaciya i modelirovanie tehnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modelling of nuclear and thermal power plant processes], Astroprint, Odessa.
6. Duel, MA, Duel, AL & Kostykin, VA 2006, *Diagnostirovanie sostoyaniya i uslovij ekspluatatsii energooborudovaniya TES i AES* [Diagnosing the condition and operating conditions of power plant equipment and], ChP «KiK», Harkov.
7. 2010, 'Centr tehnichejskoj podderzhki operatorov v avarijnyh situacijah energoblokov №1 i №2 Hmel'nickoj i №3 i №4 Rovenskoj AES' [Operator Emergency Technical Support Centre for Khmel'nitsky Units 1 and 2 and Rivne NPP Units 3 and 4], *Energetika i elektrofikaciya*, no 12, Pp.12–32.
8. Duel, TL 2000, 'Ekonomicheskaya effektivnost ASU energoblokami' [Cost-effectiveness of power unit ACS], *Trudy IpMASH NAN Ukrainy*, Pp. 156–161.
9. Shelepov, IG & Mihajskij, DV 2006, 'O nekotoryh problemah ocenki energosberezheniya pri ekspluatatsii ustarevshego oborudovaniya TES' [On some problems in assessing energy savings in the operation of outdated TPP equipment], *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no 1/2(19), Pp. 173–175.

Стаття надійшла до редакції 03 липня 2023 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-вимірвальна 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 помилки.

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 загально прийнятою 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 англомовних 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:

Fritzkowski, 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 vantazhopidomnykh mashyn*, RVV MDAU, Mykolaiv.

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 (Свідоцтво 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 31. – 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 31. – 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 14.07.2023, Формат 60×84 ¹/₈. Умов. друк. арк. – 15,1.
Гарнітура *Times New Roman*. Друк цифровий. Наклад 50 прим. Ціна договірна.

Віддруковано в ТОВ «Оберіг»

61140, м. Харків, проспект Гагаріна. 62, к. 97.

Свідоцтво про реєстрацію видавничої діяльності ДК № 3045 від 07.12.2007 р.