



29

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 10.32820/2079-1747-2022-29

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

2022
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

2022, № 29

Збірник наукових праць

Засновник

Українська інженерно-педагогічна академія
(УІПА)

Видається з грудня 2007 р.

Свідоцтво про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
Серія KB № 12132 – 1016Р від 26.12.2006.
ISSN 2079 – 1747
DOI 10.32820/2079-1747-2022-29

Мови видання:

українська, англійська

Друкується за рішенням Вченої ради УІПА,
протокол №3 від 04.10.22 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, 2022

Шановні автори публікацій!

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

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

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

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

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

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

Головний редактор

Купріянов Олександр Володимирович

Dear Authors,

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

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

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

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

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

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

Oleksandr Kupriyanov

Editor-in-Chief

ЗМІСТ

<u>Матеріалознавство</u>	5
Стрельчук Р.М. Аналіз якості обробки в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів.....	5
<u>Галузеве машинобудування</u>	15
Панов О.В., Сімсон Е.А. Оптимізація силової конструкції ґрунтообробного обладнання на прикладі шлейф борони «ЛАРІ»	15
<u>Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка</u>	32
Буданов П.Ф., Хом'як Е.А. Удосконалення системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента ядерного реактора	32
Грінченко Г.С., Теслов О.А., Козлов М.С., Марченко О.О., Захаров С.О., Герасимов Є.В. Алгоритм проектування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ	50
Грінченко Г.С., Артюх С.М., Грінченко В.В., Негодов С.С. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації.....	62
Грінченко Г.С., Тріщ Ю.В., Грінченко В.В., Багаєв І.О., Фатєєва Л.Ю. Підходи щодо оцінювання ризиків функціонування систем об'єктів різного призначення	70
Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Хоменко В.В., Василець Т.Ю., Фурсова Т.М. Підвищення точності виміру та контролю параметрів систем паливоподачі парових котлів електростанцій	80
Сороколат Н.А., Фатєєва Л.Ю. Оцінювання якості процесів системи управління безпекою праці, згідно вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018.....	89
Чеботарьов А.М., Бондаренко Ю.О. Аналіз нормативного забезпечення ефективності роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій.....	97
Кирисов І.Г., Буданов П.Ф. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів	104
До уваги авторів	118

DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-5-14

УДК 621.923

АНАЛІЗ ЯКОСТІ ОБРОБКИ В УМОВАХ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ

© Стрельчук Р.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Інформація про автора:

Стрельчук Роман Михайлович: 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

Електроерозійне алмазне шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє обробляти важкооброблювані матеріали. Процес формування обробленої поверхні залежить, крім від електричних режимів обробки, ще й від матеріалу заготовки, від робочої рідини і т.д. Ці параметри не пов'язані, отже, кожен з них робить свій вплив на хід процесу. Тому аналіз якості обробки в залежності від електричних режимів обробки виконувався з використанням імовірісно-статистичного моделювання.

У статті проведено імовірно-статистичне моделювання шорсткості поверхні деталі в процесі електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів. Встановлено взаємозв'язок між електричними режимами обробки і показниками якості обробленої поверхні деталі. Отримано вероятностну-статистичну модель шорсткості поверхні деталі, що формується при електроерозійному шліфуванні, яка встановлює взаємозв'язок між висотними параметрами поверхні та електричними режимами обробки.

Розроблена модель, дозволяє розрахувати висотні параметри шорсткості деталі в залежності від електричних режимів електроерозійного шліфування. Висота мікронерівностей визначається тими ж умовами обробки, що і глибина ерозійних лунок. Отримання низької шорсткості можливо при зниженні електричних режимів обробки.

Отримані співвідношення дозволяють безпосередньо визначити імовірність контактування нізрізаної від тіла заготовки стружки, утвореною різальною крайкою зерна, з поверхнею зв'язки шліфувального круга. При вирішенні задачі про імовірність контактування сукупності стружок, утворених сукупністю крайок зерен, котрі знаходяться в робочому шарі інструменту, необхідно також використовувати імовірність щільності розподілу по глибині.

Вид отриманих співвідношень безпосередньо показує, що значна частина стружок утворених різальними крайками, що контактують з шорсткою поверхнею заготовки, є короткими і не стикаються зі зв'язкою до відриву від тіла заготовки навіть без урахування їх усадки.

Ключові слова: зона обробки, ерозійні лунки, міжелектродний зазор, алмазний круг, деталь.

Strelchuk R. «Analysis of treatment quality in electrical discharge conditions grinding with changing polarity of electrodes»

Electrical discharge diamond grinding with changing polarity of electrodes allows processing difficult-to-process materials. The process of forming the treated surface depends, in addition to the electrical modes of processing, also on the material of the workpiece, the working fluid, etc. These parameters are not related, so each of them affects the process. Therefore, the analysis of the quality of processing depending on the electrical modes of processing was performed using probabilistic-statistical modeling.

The probabilistic-statistical modeling of roughness of a surface of a part in the course of electroerosive grinding with variable polarity of electrodes was conducted and is presented in the article. The interrelation between electric modes of processing and indicators of quality of the processed surface of a part was established. A probabilistic-statistical model of surface roughness of a part formed by electroerosive grinding was obtained, which establishes the relationship between the height parameters of the surface and the electrical modes of processing.

The developed model allows calculating height parameters of roughness of a part depending on electric modes of electroerosive grinding. The height of microroughnesses is determined by the same processing conditions as the depth of erosion holes. Obtaining low roughness is possible by reducing the electrical processing modes.

The obtained ratios allow determining directly the probability of contact of the cut chip cut from the body, formed by the cutting edge of the grain, with the bond surface of the grinding wheel. When solving the problem of the probability of contacting the set of chips formed by the set of edges of the grains that are in the working layer of the tool, it is also necessary to use the probability of depth distribution density.

The type of obtained ratios directly shows that a significant part of the chips formed by the cutting edges in contact with the rough surface of the workpiece are short and do not come into contact with the ligament until separation from the body of the workpiece, even without shrinkage.

Keywords: processing zone, erosion holes, interelectrode gap, diamond wheel, part.

Вступ

Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє отримувати необхідні якісні та кількісні показники при значному зниженні питомої витрати алмазного круга і витрат різних видів енергії [1, 2]. Це пояснюється тим, що зміна часу на електродах полярності та відповідної частоти проходження імпульсів забезпечує стабільні умови процесу шліфування. Змінюючи частоту імпульсів, їх шпаруватість і потужність при відповідній зміні полярності електродів, можна регулювати безпосередньо сам процес, аж до рівноважного стану, забезпечивши рівнозначний прояв електрофізичних та електрохімічних (навіть за їх незначності) процесів щодо обох електродів. Процес взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів не досліджений. У зв'язку з цим у роботі проведено аналіз якості обробки, та встановлені особливості та закономірності взаємодії різального інструменту з поверхнею оброблюваного матеріалу.

Взаємодія алмазного круга з поверхнею оброблюваного матеріалу при електроерозійному шліфуванні є складною електрофізичною системою [3,4]. Вона є одночасно місцем мікрорізання та дії розрядів у міжелектродному проміжку. При додатку напруги в цій зоні виникає електричний струм, який проходить через перемикаючі міжелектродний проміжок струмопровідні містки, робочу рідину, що має деяку електропровідність, і через розряд, що виникає, в період його дії.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Якість поверхні при електроерозійному шліфуванні досліджено у ряді робіт [5-7], але в умовах зміни полярності електродів у зоні різання практично не вивчена [8-10]. Відомо, що кращі умови мікрорізання алмазними зернами сприяють формуванню обробленої поверхні з малою шорсткістю поверхні, без мікротріщин і мікрodefektів, а невелика теплонапруженість процесу забезпечує отримання приповерхневого шару з невеликими фазовими і структурними перетвореннями, порівняно з вихідним станом, і як правило зі сприятливими стискаючими залишковими напругами [11-13].

Умови електроерозійного шліфування з змінною полярністю електродів мають свої особливості, в основному пов'язані з дією в зоні формування обробленої поверхні високочастотних електричних розрядів, тобто при обробці матеріал відчуває дещо інші дії, ніж при звичайному шліфуванні. Електричні розряди забезпечують "гостроту" круга, підвищується виступання алмазних зерен. При дії електричних розрядів у зоні обробки істотно зменшується, а в більшості випадків усувається контактний-фрикційний вплив зв'язки на поверхню, що обробляється, тобто знижуються сили тертя і зменшується їх внесок у тепловий фактор. Поверхня формується гострим ріжучим рельєфом круга із збільшеним міжзеренним простором. Це сприяє деякому зниженню сил мікрорізання, кращого розміщення стружки в міжзеренному просторі і кращому проникненню мастильно-охолоджуючого технологічного середовища на контактні ділянки мікрорізання. При цьому кавітаційні явища, що ініціюються розрядами, сприяють інтенсифікації дії рідкого середовища. Якщо до того ж врахувати, що при електроерозійному шліфуванні різання здійснюється зернами, на яких можливе утворення додаткових мікро- та субмікрокромок, а також те, що мікрорізання відбувається з дещо більшими швидкостями і відповідно з меншим коефіцієнтом тертя, ніж при звичайному шліфуванні, то можна зробити висновок, що основні умови шліфування є сприятливими для формування якісного поверхневого шару.

Аналіз якості обробки зазвичай оцінюється точністю і шорсткістю поверхні деталі. Для визначення шорсткості поверхні виконувалось імовірісно-статистичне моделювання. При електроерозійному шліфуванні шорсткість оброблюваної поверхні формується в результаті утворення окремих лунок, що перекривають одна одну. Кожна лунка може бути представлена у вигляді шарового сегмента. Оскільки шаровий сегмент має геометричну симетрію щодо вертикальної осі, завдання утворення лунок розглядалось у двовірній постановці. Перетин лунки є: круговий сегмент, радіус дуги якого дорівнює радіусу шарового сегмента.

Методика дослідження і побудова математичної моделі

Зважаючи на стохастичний характер процесу утворення ерозійних лунок, для визначення шорсткості поверхні використовувався метод імовірісно-статистичного моделювання (метод Монте-Карло), який полягає в наступному [14]. Окрема вершина і впадина нерівностей поверхні, що обробляється, формуються при накладенні двох лунок (рис. 1), яке моделювалося багаторазово. Для цього розігрувалися за допомогою датчика випадкових чисел згідно із законом нормального розподілу значення геометричних параметрів лунок (d_l і h_l) та величини параметрів перетину лунок та виходили їх крайові значення.

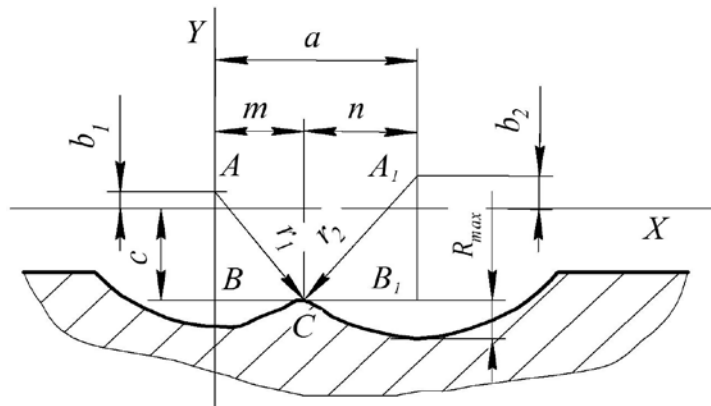


Рис. 1 – Схема розрахунку шорсткості оброблюваної поверхні

Шорсткість оброблюваної поверхні R_{max} розраховувалася за формулою:

$$R_{max} = r_{max} - b_{max} - c_{min} , \quad (1)$$

де r_{max} – найбільше значення радіусу дуги; b_{max} – найбільше значення відстані між віссю X та центром більшої дуги з усіх реалізацій; c_{min} – найменше значення відстані між точкою перетину дуг та віссю X із усіх реалізацій. Визначимо параметр c при перетині двох лунок. Відстань по осі X між центрами двох дуг a , що перетинаються, визначається з діапазону від a_{max} до a_{min} і може бути знайдено як

$$a = m + n , \quad (2)$$

де m – відстань між центром першої дуги та точкою перетину дуг; n – відстань між центром другої дуги та точкою перетину дуг.

З трикутників ABC та A_1B_1C маємо:

$$r_1^2 = m^2 + (b_1 + c)^2 , \quad (3)$$

$$r_2^2 = n^2 + (b_2 + c)^2 , \quad (4)$$

де r_1, r_2 – радіуси двох дуг, що перетинаються; b_1, b_2 – відстані між віссю X та центрами двох дуг.

Вирішуючи рівняння (3) та (4), отримаємо:

$$m = \sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} ,$$

$$n = \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} .$$

Сумуючи m і n , маємо:

$$m + n = \sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} + \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} . \quad (5)$$

З урахуванням (2) вираз (5) можна привести до вигляду:

$$\sqrt{r_1^2 - (b_1 + c)^2} + \sqrt{r_2^2 - (b_2 + c)^2} - a = 0 .$$

Параметр c не може бути знайдений у явному вигляді з отриманого виразу, тому для вирішення використовуємо чисельний метод [15].

Відомо [16], що співвідношення між глибиною та діаметром ерозійної лунки має вигляд:

$$\frac{d_{\text{л}}}{h_{\text{л}}} = 3 \dots 4 . \quad (6)$$

З трикутника ABC (рис. 2) маємо

$$r^2 = \left(\frac{d_{\text{л}}}{2} \right)^2 + k^2 \quad (7)$$

З іншого боку

$$r = k + h_{\text{л}} .$$

Звідси визначимо

$$k = r - h_{\text{л}}. \quad (8)$$

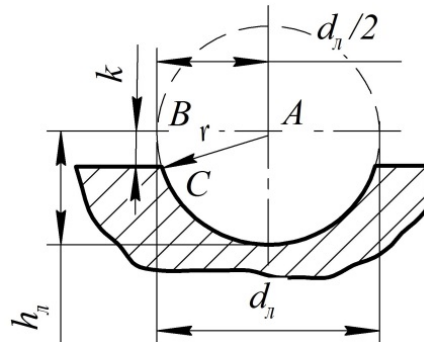


Рис. 2 – Схема розрахунку радіусу дуги електроерозійної лунки

З урахуванням (8) та (6) вираз (7) може бути представлений як

$$5h_{\text{л}}^2 - 2h_{\text{л}}r = 0.$$

Вирішуючи отримане рівняння, знаходимо залежність радіусу дуги r від глибини лунки $h_{\text{л}}$:

$$r = 2.5h_{\text{л}}. \quad (9)$$

Визначимо максимальну відстань a_{max} по осі X між центрами двох дуг, що перетинаються. При цьому точка перетину знаходиться на зовнішній оброблюваній поверхні (рис. 3).

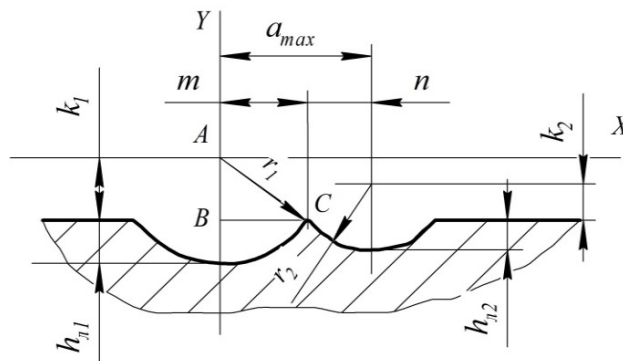


Рис. 3 – Схема визначення параметра a_{max}

З рівняння (9) виразимо $h_{\text{л}}$

$$h_{\text{л}} = 0.4r. \quad (10)$$

Підставляючи (10) до (8), отримаємо:

$$k = 0.6r. \quad (11)$$

Параметр a_{max} визначається як

$$a_{\text{max}} = m + n. \quad (12)$$

З трикутника ABC маємо:

$$r_1 = m^2 + k_1^2.$$

Звідси

$$m = \sqrt{r_1^2 - k_1^2}.$$

З урахуванням співвідношення (11) отримаємо:

$$m = 0.8r_1. \quad (13)$$

Аналогічно:

$$n = 0.8r_2. \quad (14)$$

Підставляючи залежності (13) і (14) до рівняння (12), отримаємо остаточний вираз для визначення a_{max} :

$$a_{max} = 0.8(r_1 + r_2). \quad (15)$$

Визначимо мінімальну відстань a_{min} по осі X між центрами двох дуг, що перетинаються. При цьому точка перетину двох дуг знаходиться на внутрішній поверхні оброблюваного матеріалу (рис. 4).

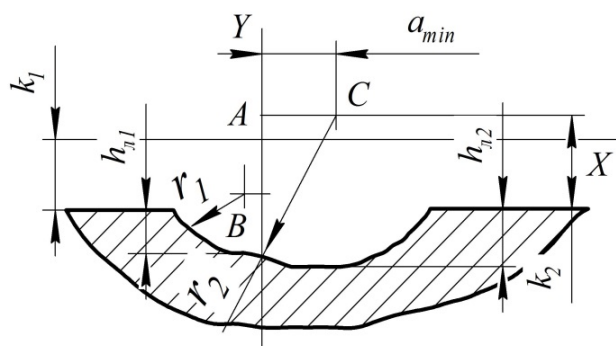


Рис. 4 – Схема визначення параметра a_{min}

З трикутника ABC маємо:

$$r_2^2 = (h_{11} + k_2)^2 + a_{min}^2. \quad (16)$$

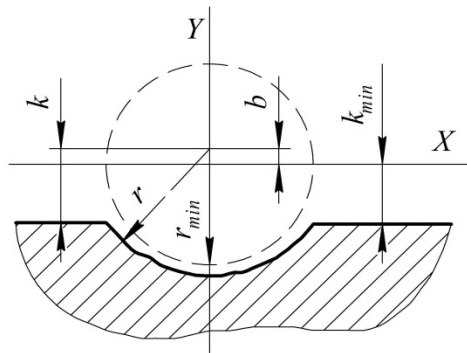
З урахуванням співвідношень (10) та (11) можна записати:

$$r_2^2 = 0.16r_1^2 + 0.48r_1r_2 + 0.36r_2^2 + a_{min}^2. \quad (17)$$

Вирішуючи отримане рівняння щодо a_{min} отримаємо:

$$a_{min} = \sqrt{0.64r_2^2 - 0.48r_1r_2 - 0.16r_1^2}. \quad (18)$$

Вважатимемо, що центр дуги з мінімальним радіусом r_{min} знаходиться на осі X . Тоді, враховуючи співвідношення (6), центр дуги з великим радіусом буде перебувати вище по осі Y . Виходячи з цього, визначимо параметр b (рис. 5).

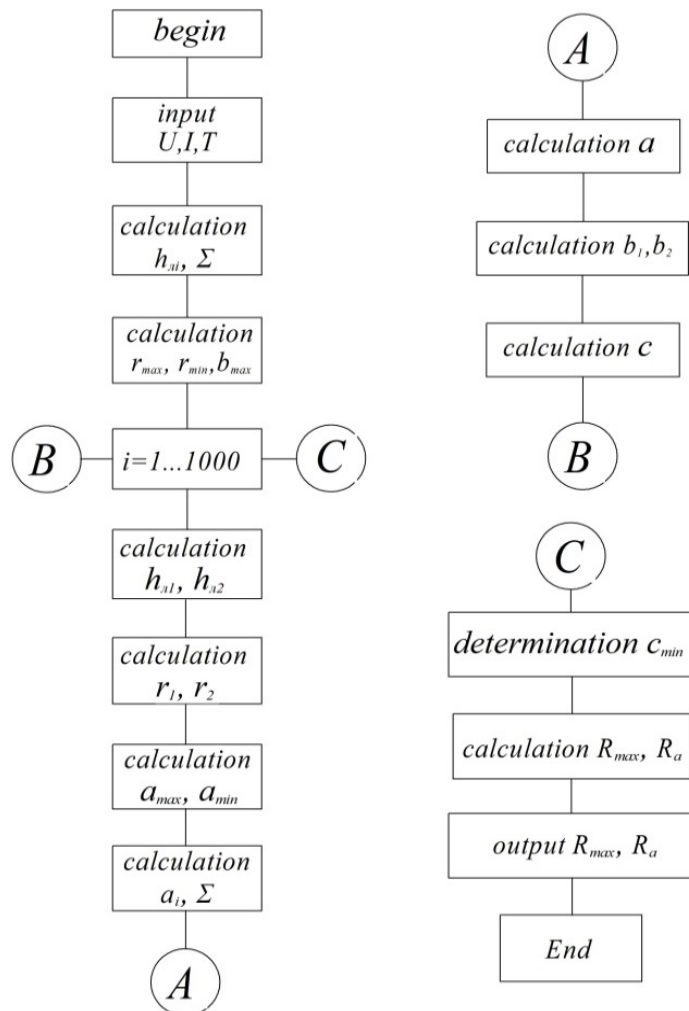
**Рис. 5** – Схема визначення параметра b

Виразимо b через k і k_{min} і, враховуючи (11), отримаємо:

$$b = 0.6(r - r_{min}). \quad (19)$$

Результати дослідження

Відповідно до наведеної методики було розроблено алгоритм розрахунку, схема якого наведена на рис. 6. Послідовність розрахунку наступна. Задаються значення електричних

**Рис. 6** – Схема алгоритму розрахунку параметрів шорсткості оброблюваної поверхні деталі

режимів: напруги U , сили струму I , тривалість зміни полярності електродів T . Потім розраховується математичне очікування глибини ерозійної лунки h_l і середньоквадратичне відхилення. Далі визначаються значення величин r_{max} , r_{min} , b_{max} . Після цього відбувається за допомогою датчика випадкових чисел розігрування згідно із законом нормального розподілу параметрів h_{l1} , h_{l2} , r_1 , r_2 , a , b_1 , b_2 , c . Кількість повторень приймається рівним 1000. Потім визначається c_{min} . Далі розраховуються параметри шорсткості поверхні: R_{max} , R_a , R_z .

Результати розрахунків за розробленою математичною моделлю були проведені у програмі *Matlab*. Візуалізація результатів розрахунків, тобто просторове положення ерозійних лунок та утворення мікронерівностей поверхні під дією електричних розрядів після електроерозійного шліфування на протязі різного часу обробки наведено на рис.7.

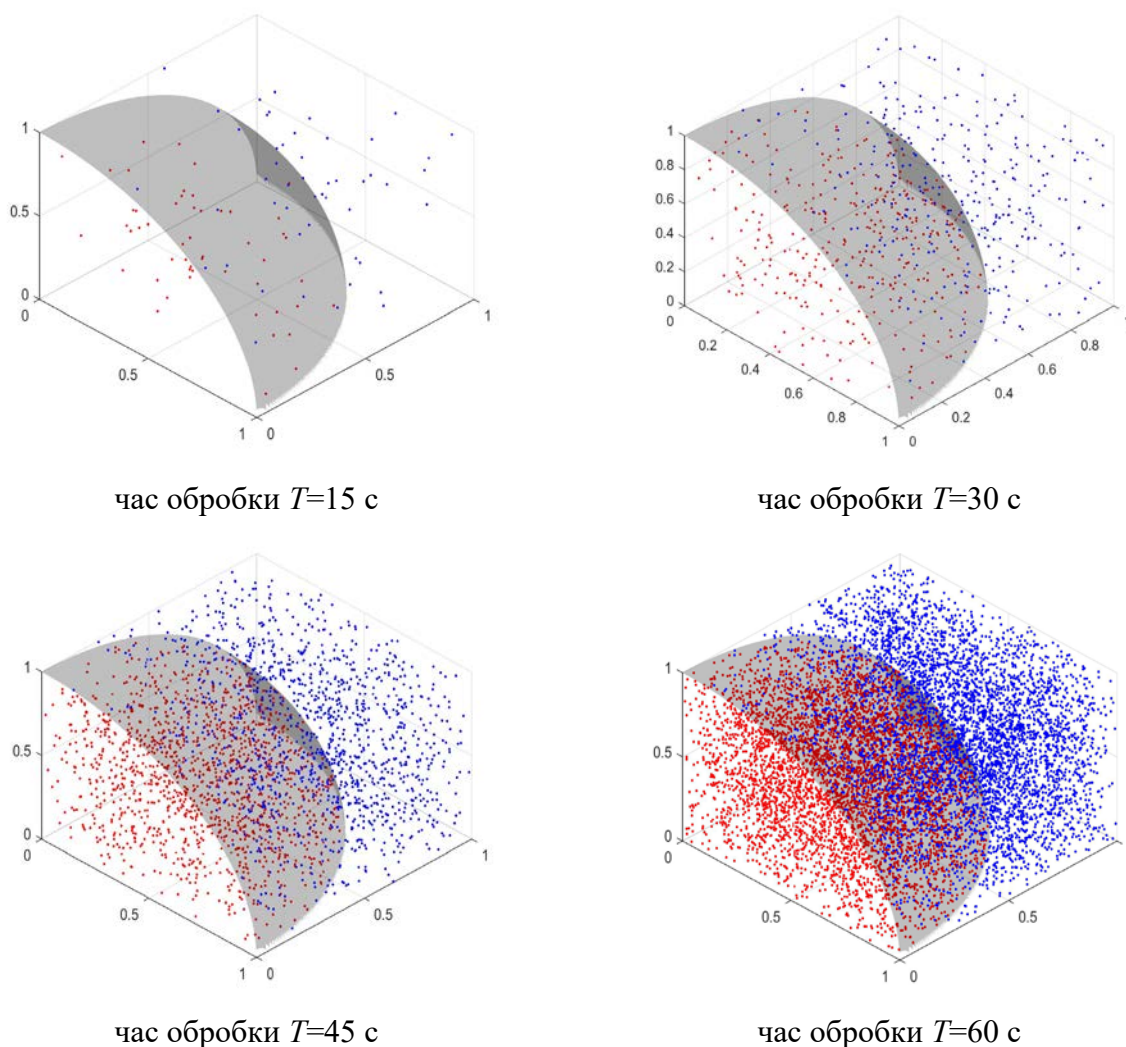


Рис. 7 – Візуалізація результатів розрахунків

Розроблена модель, що враховує просторове становище ерозійних лунок, їх статистичні розміри, дозволяє розраховувати параметри шорсткості поверхні деталі, які, зрештою, дають можливість прогнозувати довговічність деталі, що формується. Процес електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів дозволяє зменшити параметри шорсткості поверхні, що веде до збільшення довговічності і надійності роботи оброблюваної деталі.

Висновки

Таким чином, в статті досліджено формування шорсткості поверхні в умовах електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів в зоні резання. Розроблено математичну модель шорсткості поверхні з урахуванням ерозійних процесів, що впливають на зв'язку круга. При побудові враховано розмірне зношування, процеси сколювання та викидання поодиноких абразивних зерен із зв'язки, під дією складових сил різання, з урахуванням ймовірності контакту зерен з металом, величини майданчиків зносу та дійсної глибини мікрорізання.

Отримані співвідношення дозволяють безпосередньо визначити ймовірність контактування нізрізаною від тіла заготовки стружки, утвореною різальною крайкою зерна, з поверхнею зв'язки шліфувального круга. При вирішенні задачі про ймовірність контактування сукупності стружок, утворених сукупністю крайок зерен, що лежать в робочому шарі інструменту, необхідно також використовувати ймовірність щільності розподілу по глибині.

Вид отриманих співвідношень безпосередньо показує, що значна частина стружок утворених різальними крайками, що контактують з шорсткою поверхнею заготовки, є короткими і не стикаються зі зв'язкою до відриву від тіла заготовки навіть без урахування їх усадки.

Отримані співвідношення можуть бути використані і при вирішенні відповідних завдань шліфування периферією круга, наприклад, круглого зовнішнього шліфування. При більш чіткому описі процесу необхідно безпосередньо застосовувати нестационарне уявлення з урахуванням додаткових нестационарних, внесених траєкторіями різальних крайок як функцій кута повороту круга і деталі в процесі їх взаємодії.

Список використаних джерел:

1. Пат. України на корисну модель №131894, МПК (2018.01) B24B 1/00. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук, М. Д. Узунян. – № u 201806851 ; заявл. 18.06.2018 ; опубл. 11.02.2019. – Бюл. № 3.
2. Montes J. Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders / J. Montes, F. Cuevas, F. Reina // *Met. Mater. Int.* – 2020. – № 26. – P. 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). – P. 489–497.
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. – P. 53–59.
5. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity / R. Strelchuk, O. Shelkovyi // *Lecture Notes in Mechanical Engineering* – 2021. – № 143. – P. 52.
6. Research of the Dependence of Geometric Parameters of Holes on Electroerosive Grinding Modes with a Changing Polarity of Electrode / R. Strelchuk [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2022. – № 1235(1):012023. – P. 1235–1241.
7. Surface integrity in material removal processes: Recent advances / I. Jawahir [et al.] // *CIRP Annals - Manufacturing Technology.* – 2011. – № 60 (2). – P. 603–626.
8. Analysis of the Material Behavior of Cemented Carbides (WC-Co) in Grinding by Single Grain Cutting Tests / F. Klocke [et al.] // *Procedia CIRP.* – 2016. – № 46. – P. 209–213.
9. Liu Xianbing Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings / Liu, Xianbing, Bi Zhang // *Journal of Materials Science.* – № 37 (15). – P. 3229–3239.
10. Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites / Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu, Zhuming Bi // *Ceramics International.* – 201. – № 43 (18). – P. 16539–16547.
11. YEffect of Electrode Material on Electrical Discharge Machining of Alumina / A. Muttamara [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2009. – № 209 (5). – P. 2545–2552.

12. Rahim M. Z. Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity / M. Z. Rahim, S. Ding, J. Mo // *Advanced Materials Research*. – 2014. – № 1025–1026. – P. 628–632.
13. Rao X. Experimental investigation on electrical discharge diamond grinding of RB-SiC ceramics / X. Rao, F. Zhang, C. Li, Y. Li // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – № 94 (5–8). – P. 2751–2762.
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). – P. 381–389.
15. Kumar Singh Yadav Experimental study and parameter design of electro-discharge diamond grinding / Kumar Singh Yadav, S., V. Yadava, V. Lakshmi Narayana // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – № 36 (1–2). – P. 34–42.
16. Shrivastava P. K. Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review / P. K. Shrivastava, A. K. Dubey // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2014. – № 228 (6). – P. 799–825.

References

1. Strelchuk, RM & Uzunian, MD 2019, *Sposib elektroeroziinoho almaznoho shlifuvannia zi zminnoi poliarnistiu elektrodiv*, UA Patent 131894.
2. Montes, J, Cuevas, F & Reina, F 2020, 'Modelling and Simulation of the Electrical Resistance Sintering Process of Iron Powders', *Met. Mater. Int.*, no. 26, 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.
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.
5. Strelchuk, R & Shelkovyi, O 2021, 'Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity', *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, no. 143, pp. 52.
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*, no. 1235 (1), pp. 1235-1241.
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.
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*, no. 46, pp. 209-213.
9. Liu, Xianbing, и Bi Zhang. 2002. «Effects of Grinding Process on Residual Stresses in Nanostructured Ceramic Coatings». *Journal of Materials Science* no. 37 (15), pp. 3229-3239.
10. Mao, Cong, Chang Liang, Yuchen Zhang, Mingjun Zhang, Yongle Hu & Zhuming Bi 2017, 'Grinding Characteristics of CBN-WC-10Co Composites', *Ceramics International*, no. 43 (18), pp. 16539-16547.
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.
12. Rahim, MZ, Ding, S & Mo, J 2014, 'Electrical discharge grinding (EDG) of polycrystalline diamond – effect of machining polarity', *Advanced Materials Research*, no. 1025–1026, pp. 628-632.
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.
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.
15. Kumar Singh Yadav, Yadava, SV & Lakshmi Narayana, V 2008, 'Experimental study and parameter design of electro-discharge diamond grinding', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 36 (1-2), pp. 34-42.
16. Shrivastava, PK & Dubey, AK 2014, 'Electrical discharge machining-based hybrid machining processes: A review', *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, no. 228 (6), pp. 799-825.

Стаття надійшла до редакції 10 травня 2022 р.

ОПТИМІЗАЦІЯ СИЛОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ГРУНТООБРОБНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ПРИКЛАДІ ШЛЕЙФ БОРОНИ «ЛАРІ»

© Панов О.В., Сімсон Е.А.

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»

Інформація про авторів:

Панов Олексій Вікторович: ORCID: 0000-0001-9794-681X; Oleksii.Panov@infiz.khpi.edu.ua; аспірант кафедри «Математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії»; Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»; вулиця Кирпичова, 2, м. Харків, 61000, Україна.

Сімсон Едуард Альфредович: ORCID: 0000-0003-4178-4828; Eduard.Simson@khpi.edu.ua; доктор технічних наук, професор кафедри «Механіка суцільних середовищ та опору матеріалів»; Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»; вулиця Кирпичова, 2, м. Харків, 61000, Україна.

В даній статті розглянута методика розрахунку рам сільськогосподарської причіпної техніки за допомогою алгоритмів топологічної оптимізації. Робота виконана з метою підвищення конкурентоспроможності продуктів українських виробників за рахунок зниження ваги та собівартості силових рам при збереженні їх міцностних характеристик на усіх режимах роботи причіпної техніки.

Для проведення оптимізації було взято одну з базових моделей культиватору виробництва фірми «Лозівські Машини», та проведено низку оптимізаційних розрахунків для отримання спочатку топології, а в решті, і конструкції силової рами для даного виду агрегатів.

В результаті проведених досліджень встановлена оптимальна топологія ключових вузлів рами агрегату і розроблена низка технологічних елементів конструкції. Отримані дані наведені в статті у графічному вигляді та проведено перевірочний аналіз міцності щодо вимог до даного типу конструкцій.

Аналіз отриманої конструкції довів правильність обраних методів оптимізації, та показав, що отримані характеристики силової рами задовольняють вимогам експлуатації сільськогосподарської техніки.

Ключові слова: топологічна оптимізація, сільськогосподарська техніка, культиватор, рамні конструкції, запас міцності.

Panov O.V., Simson E.A. "Optimization of the power design of soil tillage equipment using the "LARI" pluge harrow"

In this article, the method of calculating the frames of agricultural trailers using topological optimization algorithms is considered. The work was carried out in order to increase the competitiveness of the products of Ukrainian manufacturers by reducing the weight and cost of power frames while maintaining their strength characteristics in all modes of operation of the trailer.

To carry out the optimization, one of the basic models of the cultivator produced by the company "Lozivski Mashyny" was taken, and a number of optimization calculations were carried out to obtain first the topology, and in the rest, the design of the power frame for this type of units.

As a result of the research, the optimal topology of the key nodes of the unit frame was established and a number of technological design elements were developed. The obtained data are presented in the article graphically, and a verification analysis of the strength of the requirements for this type of structures was carried out.

The analysis of the obtained structure proved the correctness of the chosen optimization methods, and showed that the obtained characteristics of the power frame meet the requirements for the operation of agricultural machinery.

Keywords: topological optimization, agricultural machinery, cultivator, frame structures, safety margin.

Постановка задачі

Україна була і залишається однією з провідних аграрних країн світу. Тому сільськогосподарське машинобудування традиційно є однією з найважливіших галузей вітчизняної промисловості, яка, відштовхуючись від потреб внутрішнього ринку, має також і великий експортний потенціал.

Основними видами сільськогосподарського технологічного обладнання, що застосовується аграріями є навісне та причіпне обладнання, в силу можливості швидкої зміни, універсальності та відносно невеликої вартості. Фактично, близько 80% всіх сільськогосподарських операцій виконуються саме навісним та причіпним обладнанням, а у сфері обробки ґрунту – майже 95% припадає саме на таке обладнання.

До цієї великої групи належать такі типи навісного обладнання, як:

- Дискові борони (рис 1а),
- Зубові та зубо-пружинні борони (рис 1б),
- Ротаційні борони (рис 1в),
- Шлейф-борони (рис 1г),
- Культиватори (в т.ч. дискові) (рис 1д),
- Плуги,
- Глибкорозпушувачі (рис 1е).

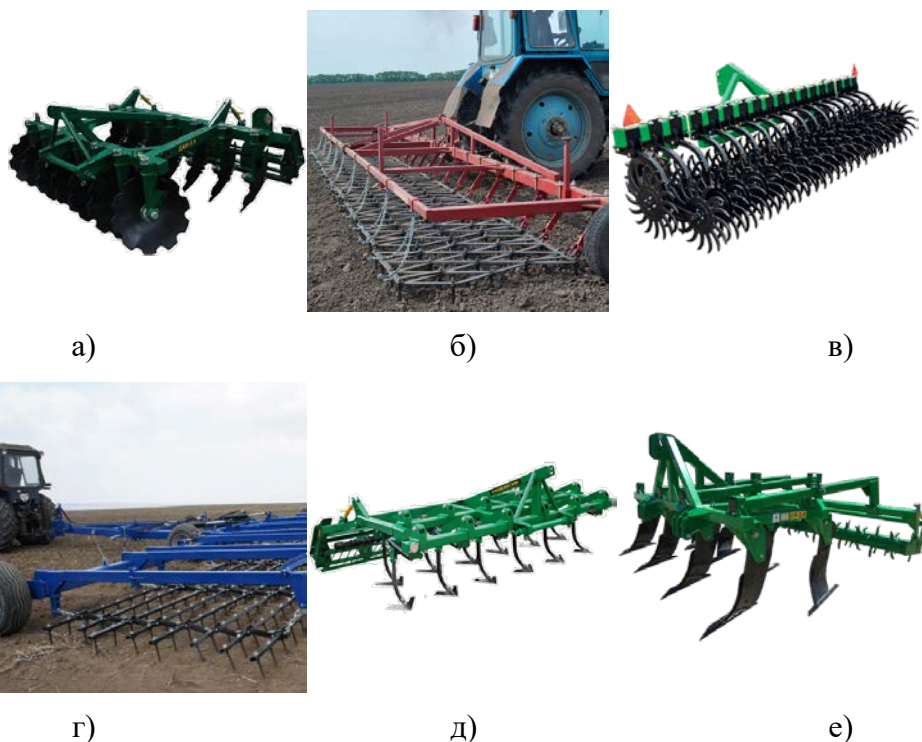


Рис. 1 – Різні типи навісного обладнання

Практично повний спектр цього сільськогосподарського обладнання розробляється та виробляється компанією «Лозівські Машини», що входить до великої приватної машинобудівної Групи компаній «УПЕК». «Лозівські Машини» - один з лідерів у конструюванні та виробництві аграрної техніки в Україні. Машини цього бренду мають репутацію надійного та ефективного обладнання з оптимальним співвідношенням ціна-якість у своєму класі.



а)



б)



в)



г)



д)



е)



є)



ж)



Рис. 2 – Продукція компанії «Лозівські Машини»: а) коротка дискова борона-луцильник; б) борона вертикального обробітку; в) важка дискова борона; г) зубопружинна борона; д) важка зубова борона; е) шлейф-борона; є) польовий культиватор; ж) передпосівний культиватор; з) ротаційна борона; і) глибокорозпушувач

Як можна побачити навіть з цих загальних фото (рис. 2), основою всіх причіпних агрегатів є силова рама, яка передає тягове зусилля від трактора (або іншого рушія) безпосередньо на робочі органи – зуби або диски борін, леза плугів, диски або решітки культиваторів й т.д. Саме конструкція силової рами в більшості і забезпечує агротехнічні властивості обладнання, економічність, вплив на середовище, а, з іншого боку, визначає їх вагу та вартість, що безпосередньо впливає на співвідношення «ціна – якість» і в кінці кінців – на конкурентоспроможність техніки.

В статті на прикладі одного з самих простих (а тому наглядних) виробів причіпної ґрунтообробної техніки – зубової шлейф-борони «ЛАРІ» (рис. 3) розглядається методологія моделювання та оптимізації силової (рамної) конструкції, яка в подальшому буде застосована авторами для оптимізації інших, більш складних конструкцій ґрунтообробного обладнання.



Рис. 3 – Шлейф-борона ЛАРІ

Згідно з потребами циклу підготовки ґрунту, основне призначення зубової шлейф-борони ЛАРІ – розпушування ґрунту та вирівнювання поля, щоб підготувати ґрунт до сівби, водночас – збереження вологи, знищення бур'янів. Борона ефективно використовується як весною, так і восени та дає можливість виїхати в поле при будь-якій погоді та набагато раніше інших агрегатів, бо ЛАРІ практично не чутлива до вологості, а конструкція робочого органу (ромбовидного зубця) виключає налипання та забивання.

Зазначений виробник «Лозівські Машини» випускають цілу низку виробів «ЛАРІ» з шириною захоплення від 7 м до 21 м. У статті, як приклад, буде розглянуто найбільшу з машин «ЛАРІ-21» з максимальною шириною захоплення ґрунтообробки – 21 м. Такий вибір пов'язаний не тільки з максимальною навантаженістю цього виробу, як в основному, робочому режимі, так і при маневруванні та переході в транспортне положення, але ще й з тим, що нова рама «ЛАРІ-21» повинна у подальшому бути уніфікованою у застосуванні при виробництві іншого дуже популярного виробу – важкою бороною «ЛІРА XL».

«ЛІРА XL-21» забезпечує відмінний розподіл навіть наймасивніших скупчень поживних залишків на поверхні поля. Це єдина борона, яка дозволяє в осінній період працювати по пересушеному ґрунту, руйнуючи поверхневу кірку, тим самим виключаючи подальше випарування вологи. Унікальність «ЛІРА XL» полягає в тому, що вона дозволяє проводити 5 операцій за один прохід. Наприклад, раннє весняне боронування та розпушування поверхневої кулі на глибину 2-10 см одночасно: - закриває вологу; - провокує бур'яни на проростання з подальшим їх знищенням; - вирівнює поверхню поля та готує ґрунт до сівби; - здійснює закладання мінеральних добрив та пестицидів; - рівномірно розподіляє поживні залишки.



Рис. 4 – Важка зубова борона ЛІРА XL

В статті використовується методика поєднання методів топологічної та параметричної оптимізації. Основні прийоми параметричної оптимізації наведені у монографії [1]. Деякі корисні ідеї щодо топологічної оптимізації силових рамних конструкцій запропоновані у статтях [2 - 4]. Розрахунок та проектування навантажених конструкцій навісних та причіпних агрегатів розглядалися в дослідженнях [5 - 7], однак авторам не вдалося знайти роботи, які поєднували б топологічну оптимізацію структури рамної конструкції поряд з параметричною оптимізацією її елементів. Як інструмент твердотільного моделювання використовувалися пакети CREO (PTC, США) та Solid Works (DassaultSystemes, Франція), а для аналізу напружено-деформованого стану - CREO (PTC, США) та ANSYS (AnsysInc. США) разом з програмуванням алгоритмічних оболонок параметричної оптимізації.

Виклад основного матеріалу:

В процесі рішення тестових задач оптимального проектування автори прийшли до наступної послідовності етапів чисельного процесу

- 1) Перший етап топологічної оптимізації. Налаштування параметрів евристичного алгоритму. Отримання першого прототипу оптимальної структури силової рами.
- 2) Перший етап «отехнологічування» (технологічного спрощення) структурита прокладка головних силових елементів (балок), що неваріюються.
- 3) Другий етап топологічної оптимізації після введення силових елементів (балок), що не варіюються
- 4) Другий етап технологічного спрощення структури шляхом закріплення нових силових елементів (балок), що не варіюються.
- 5) Останній етап топологічної оптимізації структури силової рами
- 6) Детальна топологічна оптимізація форми окремих силових криволінійних елементів.
- 7) Параметрична оптимізація конструкції з урахуванням технологічності та уніфікації (об'єднання груп балок до одного спільного параметру, що варіюється).
- 8) Перевірочні розрахунки конструкції на навантаження у неробочих режимах (маневрування, транспортне положення тощо).

Загальна постановка задачі оптимізації виглядає наступним чином

$$\min\{J = \iiint \rho dx dy dz\}, [K]\vec{y}^{(j)} = \vec{F}^{(j)}, \sigma_i^j(\vec{x}) \leq [\sigma], j = \overline{1,3}, T \leq [T]$$

Головним критерієм (ціллю) є мінімізація матеріалоемності (ваги) конструкції. Функціональними обмеженнями варіювання виступають локальні нерівності напружень за Мізесом для кожного з трьох типів навантаження та інтегральне обмеження на час до руйнування внаслідок накопичення ушкоджень у квазістатичній постановці.

В цій статті ми розглядаємо тільки топологічну вагову оптимізацію під впливом головного детермінованого робочого режиму навантаження з урахуванням локальних обмежень короткострокової міцності. Інші режими навантаження залучаються на етапі перевірного міцнісного аналізу.

На першому етапі топологічної оптимізації рами було потрібно отримати «загальну» топологію рами під впливом робочих навантажень (тягове зусилля трактору та відповідно - сили опору ґрунту – Мал.5), а також підібрати оптимальні параметри роботи алгоритму топологічної оптимізації.

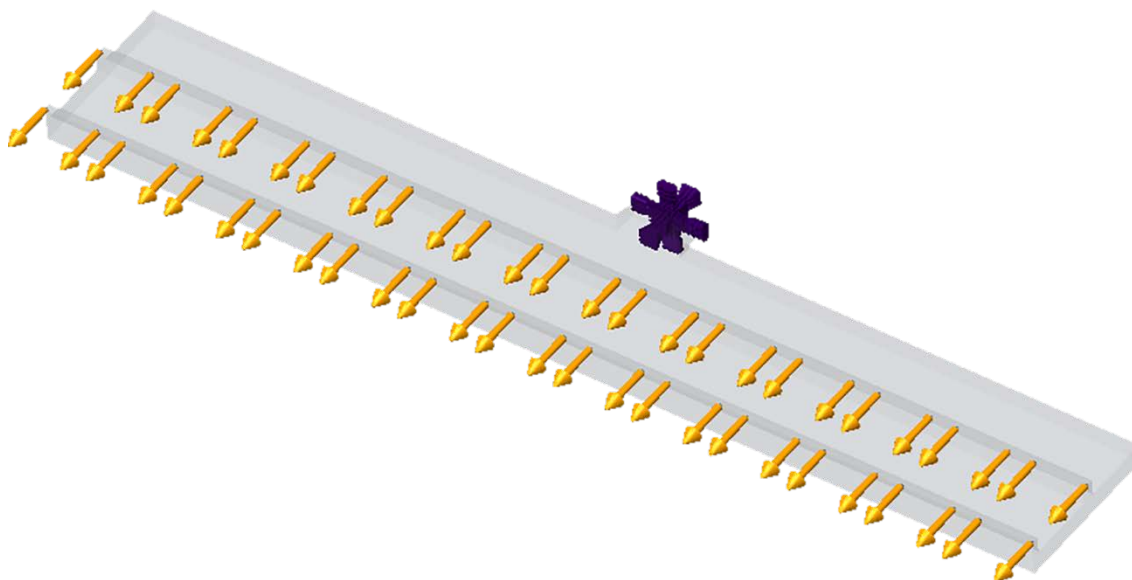


Рис. 5 – Загальна структура навантаження

Як відомо [1] евристичні алгоритми топологічної оптимізації відрізняються стратегією відкидання з початкового континууму того чи іншого кінцевого елементу якщо навантаження в ньому менше відповідного порогового рівня. В розрахунках ми використовували стратегію зниження маси з основним критерієм порогу безпеки не менше, ніж 5 кратний запас міцності, та додатково – коефіцієнт розрідженості (тобто наскільки багато може бути топологічних «гілок» у конструкції)

На першому етапі у якості початкового силового континууму використовувалася пластина, що була розбита на 997868 об'ємних елементів типу тетраедр. За результатами розрахунку (Рис. 6) при різних коефіцієнтах розрідженості конструкції та безпеки стало очевидною доцільність внесення до конструкції подовжнього силового елемента-балки (Рис. 6б).

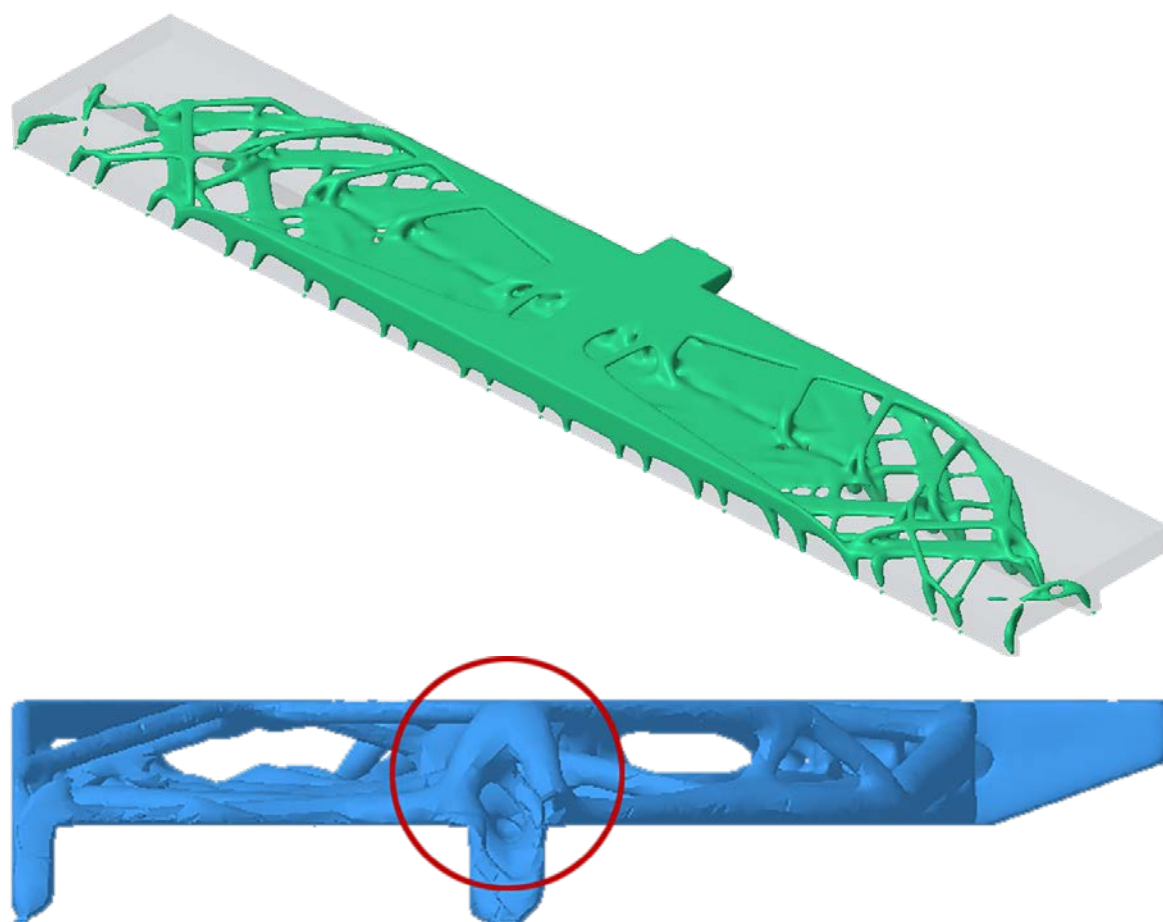


Рис. 6 – Результати розрахунків першого етапу (а – одна з проміжних ітерацій для максимального коефіцієнту розрідження, б – боковий перетин)

На другому етапі до робочого об'єму була додана подовжня силова балка і розрахунки було продовжено в тому ж робочому об'ємі.

На малюнку 7 можна побачити орієнтовну топологію майбутньої рами, як вона змінилася після введення подовжньої силової балки. Для наглядного сприйняття на зображеннях проміжних ітерацій подані тільки основні «найважчі» елементи конструкції.

Як показав аналіз на другому етапі технологічного спрощення структури рами, конструкція може бути розділена на дві умовні зони: «буксирна» та «робоча». При цьому для буксирної частини виникає очевидне спрощене рішення у вигляді основної балки та двох «підкосів» (червоні лінії на Рис. 7).

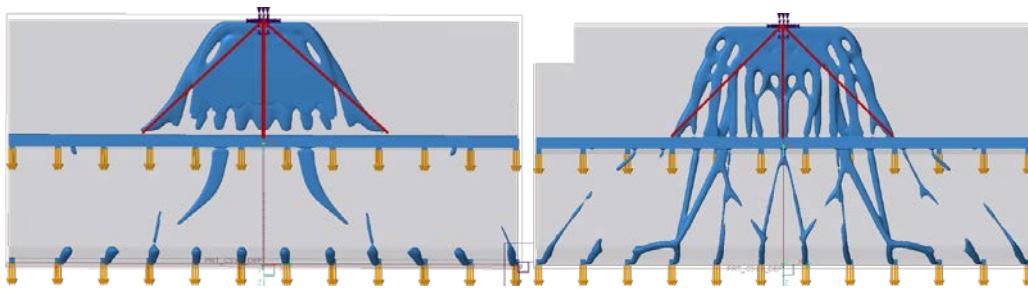
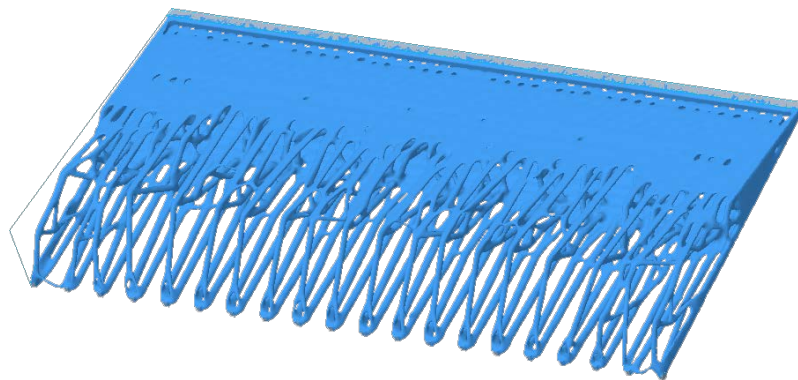
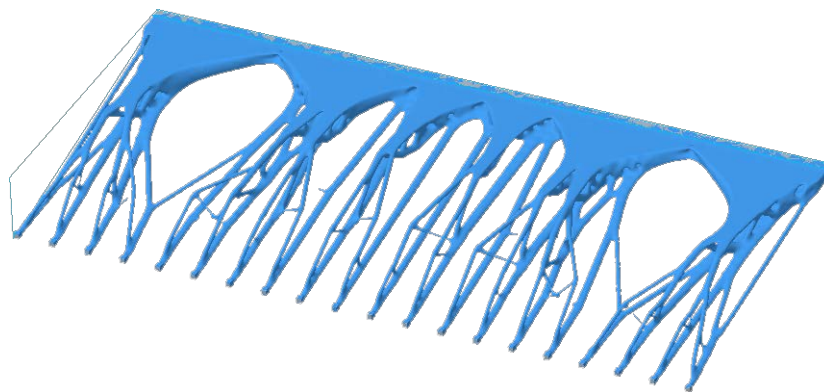


Рис. 7 – Прототипування «буксирної» зони

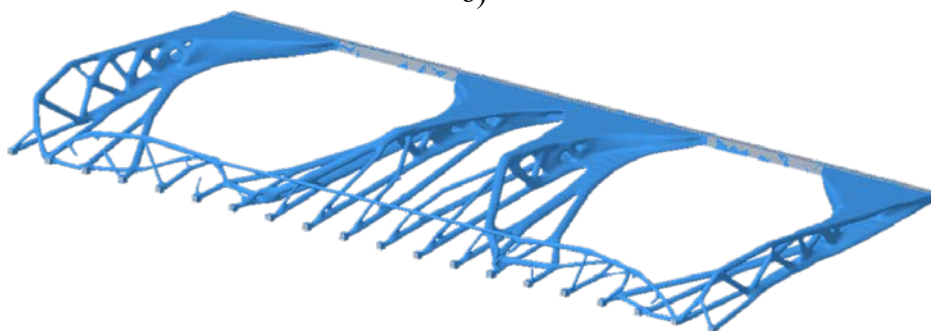
На наступному рисунку (Рис. 8) представлені варіанти розрахунків та пошуку оптимальної конструкції робочої зони знаряддя



а)



б)



в)

Рис. 8 – Розрахунок в повному об'ємі з середнім коефіцієнтом розрідженості та поступовим зменшенням допустимого використання маси. а – 40% б – 25% в – 12%

Для прискорення розрахунків на початкових ітераціях розрахунки проводилися для одного ряду кріплень.

Як ми бачимо, топологічна оптимізація в цьому випадку вельми ефективна по масі, але дуже неефективна з точки зору технологічності конструкції – частина елементів потребує хіба що 3Д печаті металів, що, навіть при наявності такого обладнання, призводить до невиправданого здороження фінального виробу і нереалістично для масового виробництва.

Тому робоча зона потребує додаткового етапу оптимізації з урахуванням оптимальної технологічності, тобто використанням «патерну» - набору силових елементів, а саме патерну, з 4 точками кріплення двох решіток борін (Рис. 9)

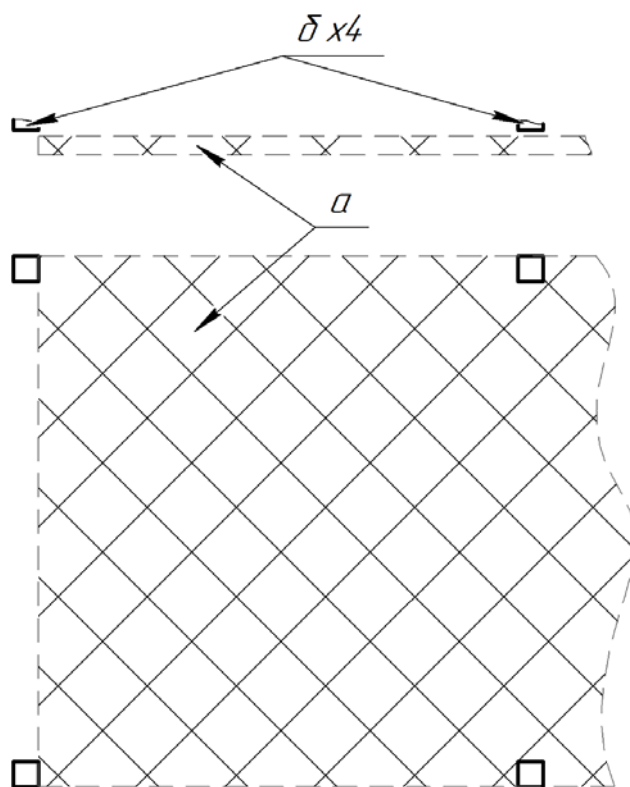


Рис. 9 – Патерн розташування кріплень у робочій зоні, де а – робочий орган (решітка), б – місця кріплення робочого органу.



Рис. 10 – Оптимізована конструкція робочої зони (перше наближення)

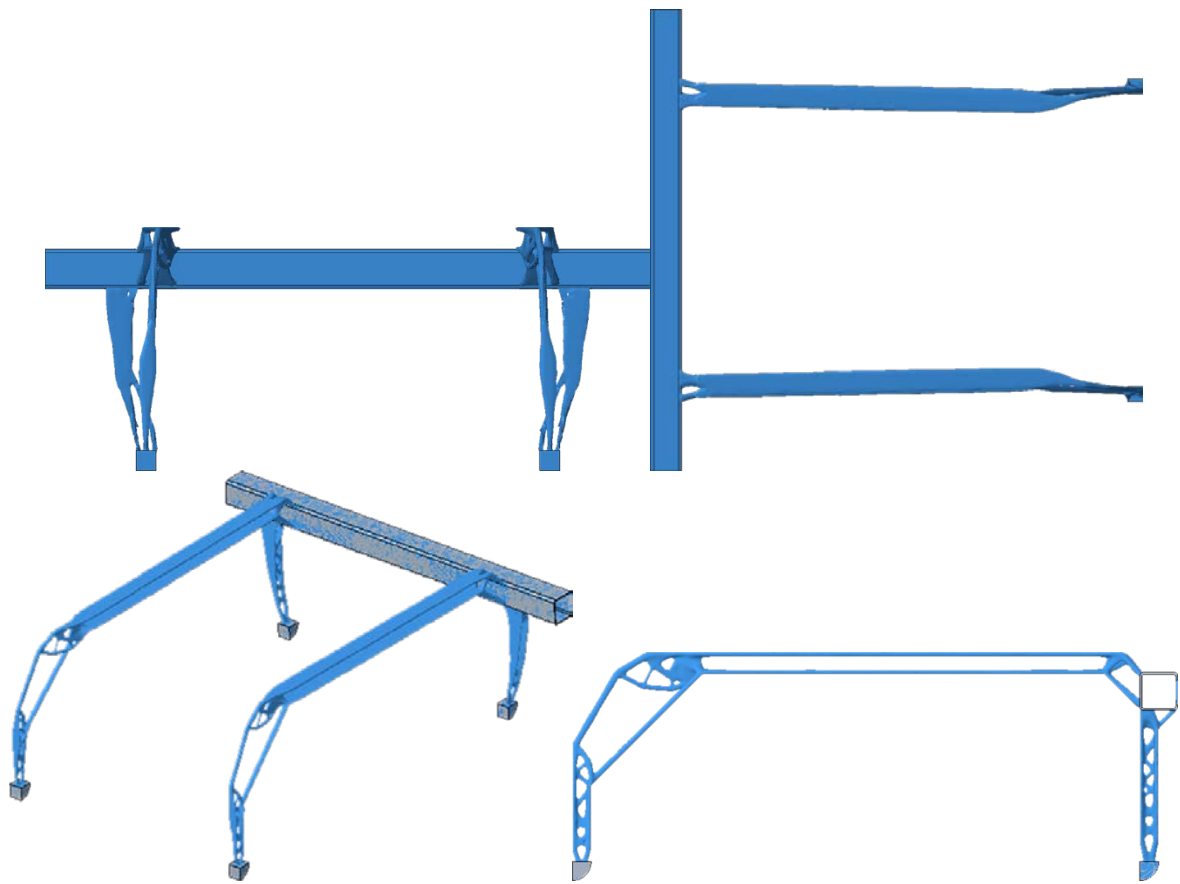


Рис. 11 – Фінальний варіант оптимізованої конструкції робочої зони

Як бачимо, отримано дуже легку конструкцію, вже більш технологічну – більшість елементів можна виконати за допомогою традиційних методів виробництва, таких як згинання та зварювання.

Тому наступним етапом стала заміна основних елементів конструкції на балки та подібні примітиви

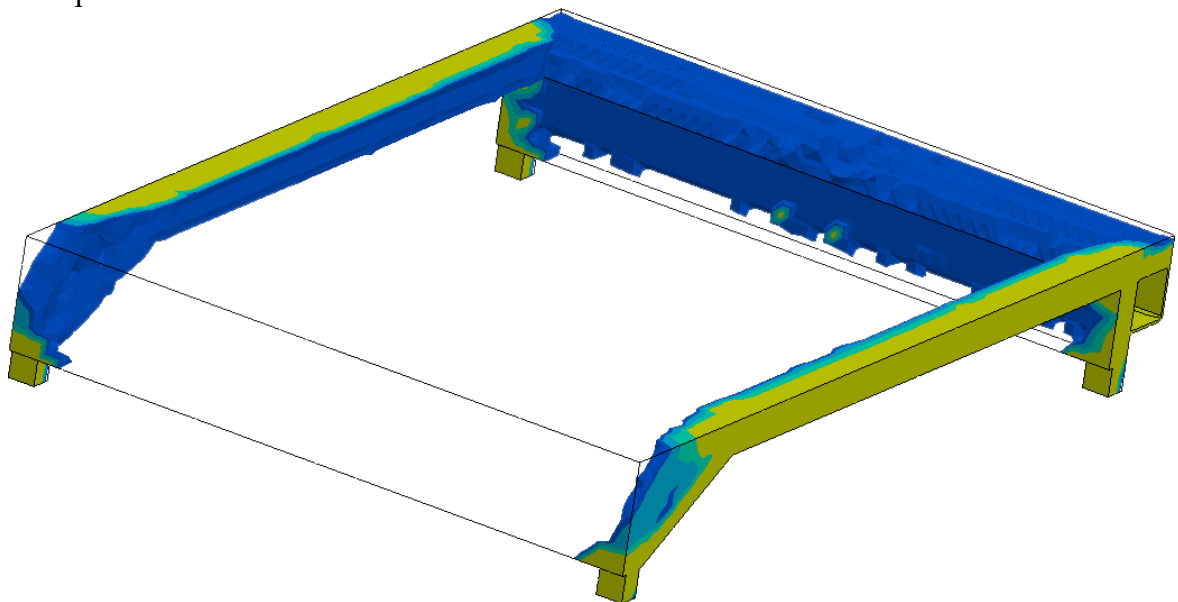


Рис. 12 – Розрахунок стержньової моделі

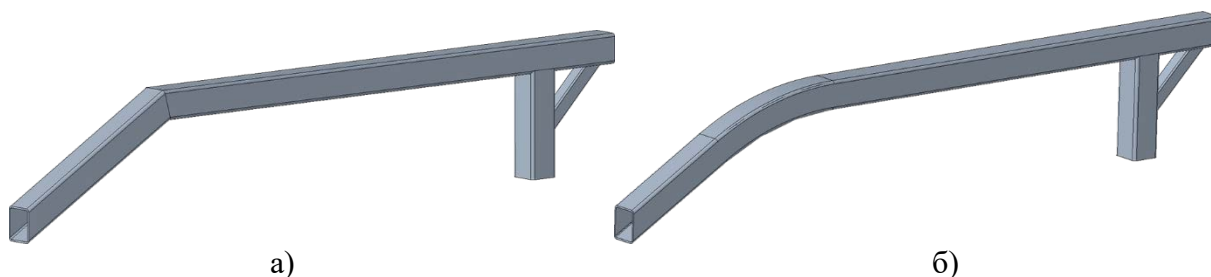


Рис. 13 – Фінальний конструктив балки кріплення, де а - зварювальний варіант, б - згинання

За результатами топологічної оптимізації виготовлена наступна конструкція Рис. 14)

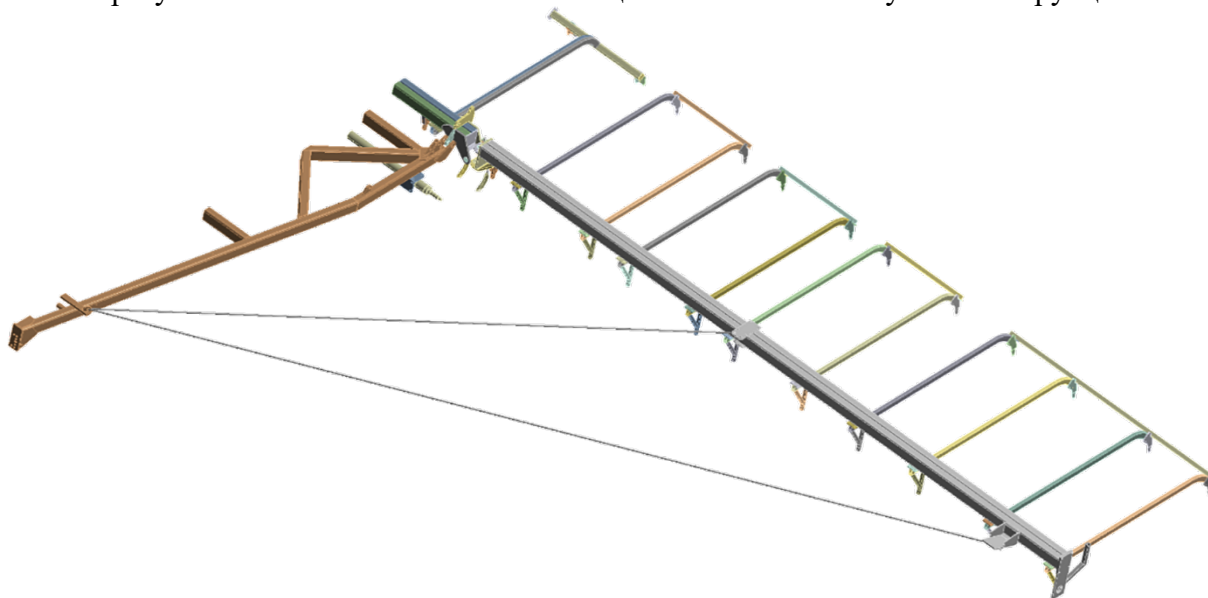


Рис. 14 – Конструкція ЛАРІ-21

Остаточна параметрична оптимізація конструкції була проведена шляхом параметричної оптимізації. В цілях уніфікації конструкції використані тільки 5 видів сортаментних балок, та відповідно, - параметрів поперечного перерізу балок, що варіюються, а саме: головної подовжньої силової балки, центральної тягової балки, інших тягових балок (розглянуто 2 випадка: всі тягові балки окрім центральної – однакові; або діляться на дві групи – центральну та периферійну); короткі подовжні білки (розглянуто 2 випадка: всі короткі подовжні балки однакові; або діляться на дві групи – центральну та периферійну). Враховуючи відносно невелику кількість параметрів, що варіюються, не має сенсу використовувати аналіз чутливості і тому в якості алгоритму оптимізації був прийнятий модифікований метод Нелдера Міда (деформованого многогранника).

Таким чином після трьох етапів топологічної оптимізації і 9 ітерацій параметричної оптимізації виявилось достатньо для отримання фінішного варіанту оптимальної силової конструкції ЛАРІ-21.

Перевірочний міцнісний аналіз оптимізованої конструкції

Наступним кроком були проведені досліді напружено-деформованого стану зубної шлейф-борони ЛАРІ-21 в робочій конфігурації на основному режимі і з урахуванням відхилення зусилля, що тягне, а також в транспортній конфігурації при відриві секцій під різними кутами. При проведенні дослідження методом кінцевих елементів для економії машинного часу розрахунку і скорочення обсягу завдання з геометрії були виключені деталі

і зборки, які не вносять істотний внесок у міцність, а саме всі металовироби, конструктив гідравліки, декоративні пластини і так далі. Несучі елементи рами зубної борони виготовлені з прокату сталі 345-09Г2С з межею плинності 343 МПа без термічної обробки, що дозволяє застосовувати IV енергетичну теорію міцності, запропоновану Мізесом.

При дослідженні напружено-деформованого стану борони на основному режимі в робочій конфігурації враховувалося, що робочі органи знаходяться на землі і при обробці ґрунту чинять опір рівний

$$F = m \cdot g \cdot k,$$

де $k = 0,4$ – коефіцієнт тертя для контактної пари сталь-ґрунт.

У результаті отримано ряд значень сил, які прикладені до рамних конструкцій, їх значення 921, 968 і 807 Н. На силовий гак прикладено зусилля рівне тязі трактора 50 000 Н. У розрахунку враховувалося дії сили тяжіння. На малюнку 1 представлений загальний вигляд ЛАРІ-21 з виключеними деталями з розрахунку в симетричній постановці

Граничні умови були обмеження всіх переміщень і поворотів в тяговому гаку, крім переміщення вздовж осі дії зусилля. Модель поведінки гідроциліндра є жорстким зв'язком між відповідними отворами. Рама та сниця представлені як шарнірне з'єднання. Вважається, що найнебезпечнішим для рамної конструкції є випадок, коли колеса ще не почали обертання і тягова сила трактора почала долати сили тертя, створювані робочими органами. Для такого початкового етапу граничною умовою є робота конструкції, коли колеса залишаються нерухомими. Для слідо-розпушувачів у збиранні врахована глибина роботи.

Також був змодельований вузол переходу у транспортне положення зі свободами відповідних осей обертання. На рис. 15 показана схема навантаження та граничні умови.

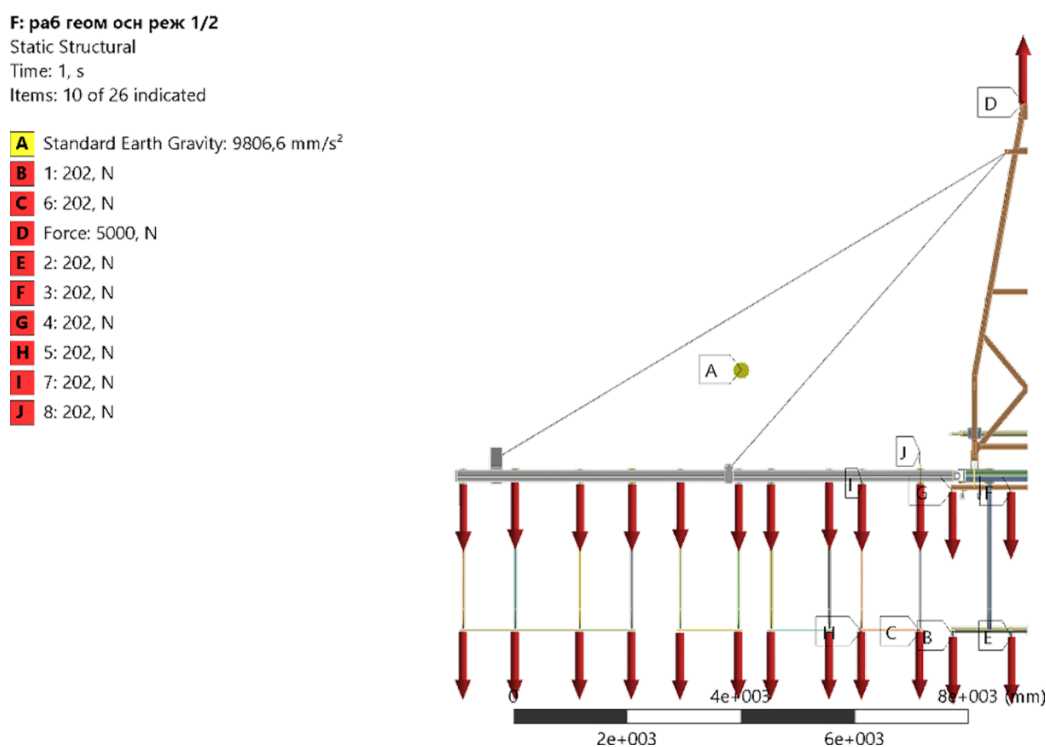


Рис. 15 – Граничні умови та схема навантаження

Метод кінцевих у тому, що будь-яку безперервну величину можна описати дискретної моделлю, що з окремих елементів [8,9]. На кожному з цих елементів досліджувана безперервна величина апроксимується кусково-безперервною функцією, за допомогою якої

визначаються значення безперервної величини, що досліджується в кінцевому числі точок аналізованої області. Розв'язання задачі із застосуванням МКЕ включає такі основні етапи.

1. Створення геометричної моделі аналізованої розрахункової області.
2. Завдання фізичних властивостей середовища (матеріалів) у розрахунковій галузі.
3. Створення кінцево-елементної моделі (дискретизація) розрахункової області, тобто. генерація сітки кінцевих елементів. Дискретизація розрахункової області включає завдання кількості, форми та розмірів кінцевих елементів. Елементи пов'язані один з одним у вузлових точках (вузлах) та в сукупності апроксимують форму розрахункової області.
4. Додаток до моделі початкових і граничних умов: зовнішніх впливів (температур, теплових потоків, сил, тиску і т.д.) і закріплень на межах області.
5. Отримання на основі функцій кінцевих елементів кусково-безперервної функції, визначеної по всій розрахунковій області. Побудова глобальної матриці жорсткості (теплопровідності та ін.).
6. Складання системи рівнянь алгебри шляхом мінімізації деякої величини, пов'язаної з фізичною постановкою задачі, і вирішення цієї системи щодо вузлових значень – температури в задачах теплопровідності, зміщень у задачах міцності і т.п.
7. Виведення результатів розрахунку у графічній та текстовій формах (поля швидкостей, деформацій та напружень, потоки тепла, температурні градієнти та ін.). [10]

З геометричної точки зору, розрахункова модель являє собою поле точок, пов'язаних між собою примітивами (відрізками прямих ліній, трикутниками, прямокутниками тощо). Так утворюється якась сітчаста структура - геометрія вихідної конструкції апроксимується накладеною на неї сіткою, і подальша робота здійснюється вже не з вихідною системою, а з отриманою сіткою.

Крім геометрії, примітиви, що з'єднують вузлові точки моделі, мають також відомі механічні властивості. Це означає, що, зв'язавши жорсткості всіх елементів сітки в єдине ціле (в рамках прийнятих у моделі припущень), можна встановити напружено деформований стан усієї системи.

Для побудови кінцево-елементної сітки був обраний тетраедральний і гексагональний тип елементів. Всі контакти в задачі розглядалися як "Bonded", що еквівалентно склеювання.

У результаті розрахунок містив у собі кінцевих 807852 елементів та 2577723 вузлів. Матриця жорсткості загальної системи рівнянь мала розмірність 15466338x15466338.

Аналіз результатів для основного режиму навантаження показав, що напруги в несучих рамних конструкціях і на кронштейнах далеко від концентраторів не перевищують 55 МПа, переміщення близько 14 мм. На рисунку 16 показані епюри розподілів еквівалентних напружень Мізеса, на рисунку 17 представлені епюри розподілу сумарних переміщень.

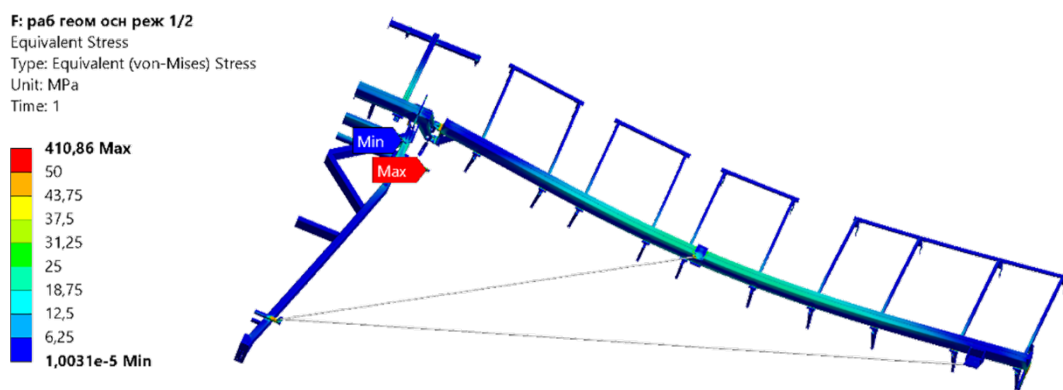


Рис.16 – Розподіл еквівалентних напруг по всій конструкції

F: раб геом осн реж 1/2
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

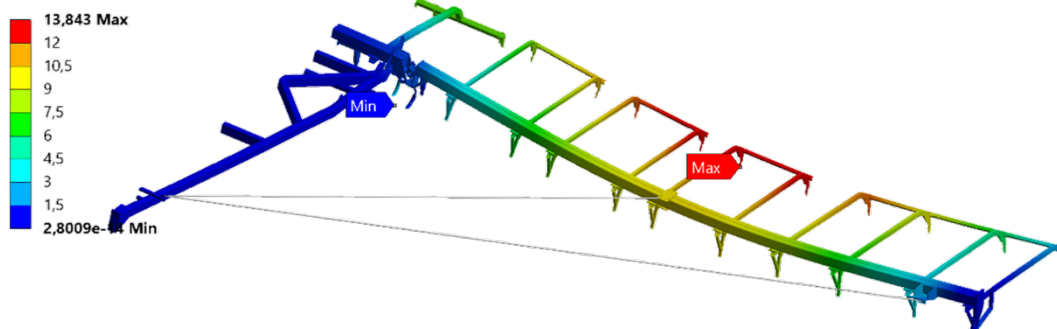


Рис.17 – Сумарні переміщення у конструкції

Найбільший внесок у переміщення для всіх типів розрахунків переходу в транспортне положення вносить Y компонента через те, що навантаження всі прикладені так само в цьому напрямку.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.2-3:2006 максимальний прогин двохопорної балки залежить від її довжини і має бути не більше $l/250$, у даному випадку $8769/250 = 35,076$ мм, у розрахунку був отриманий результат 9,89.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.2-3:2006 максимальний прогин консольно-защемленої балки повинен бути не більше $l/75$, у даному випадку $2771/75 = 36,94$ мм, у розрахунку був отриманий результат $13,83 - 10,18 = 3,65$. Усі отримані результати у межах допустимих значень.

Дослідження напружено-деформованого стану зубної шлейф-борони Ларі-21 при поступовому відриві секцій від землі під кутом 5° , 10° , 15° і переході конструкції в транспортне положення показали, що напруги далеко від концентраторів близько 130 МПа, 120 МПа та 125 МПа відповідно. При цьому сумарні переміщення складають 87 мм, 86 мм і 90 мм відповідно. Таким чином, результати дослідження показали, що максимальний прогин для двохопорної балки знаходиться в межах норми, а для консольно-защемленої балки перевищує норму по всіх трьох випадках.

Робочий режим, є основним і найбільш небезпечним для нього є несиметричне навантаження, тягова сила, що дорівнює 50 кН, прикладена під кутом. Таке навантаження характерне для об'їзду перешкод чи початку повороту.

При дослідженні напружено-деформованого стану в робочій конфігурації з урахуванням відхилення на 30° тягне зусилля в розрахунок так само була включена гравітаційна навантаження, що залежить від власної ваги. Тяговий гак вільний по переміщенням у напрямку дії сили, всі повороти та інші переміщення заборонені.

На рисунку 18 показано схему навантаження і граничні умови при гальмуванні. Розрахунок методом кінцевих елементів містив 1087851 кінцевих елементів і 3325870 вузлів. Матриця жорсткості загальної системи рівнянь мала розмірність 19955220×19955220 . [12,13]

Аналіз результатів Ларі-21 в робочій конфігурації з урахуванням відхилення на 30° тягне зусилля показав, що напруги в рамі Л далеко від концентраторів не перевищують 60 МПа, сумарні переміщення близько 13 мм. Згідно з ДСТУ Б В.1.2-3:2006, максимальний прогин як для двохопорної, так і для консольно-защемленої балки знаходиться в межах норми. На рисунку 19 показано розподіл еквівалентних напружень Мізеса, на рисунку 20 представлено розподіл сумарних переміщень.

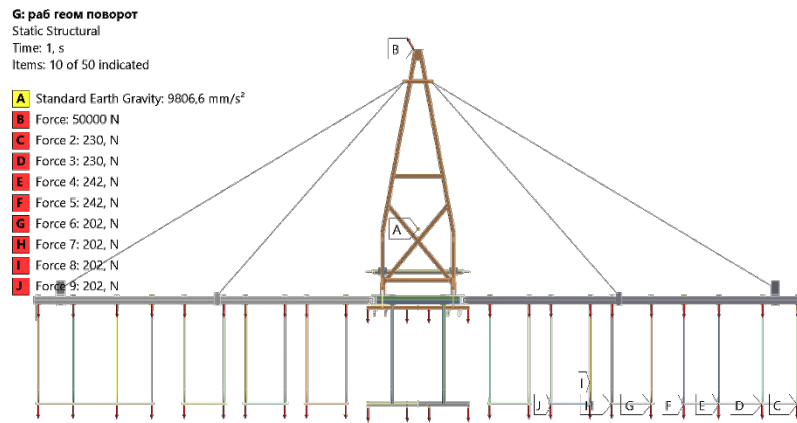


Рис. 18 – Граничні умови та схема навантаження при гальмуванні

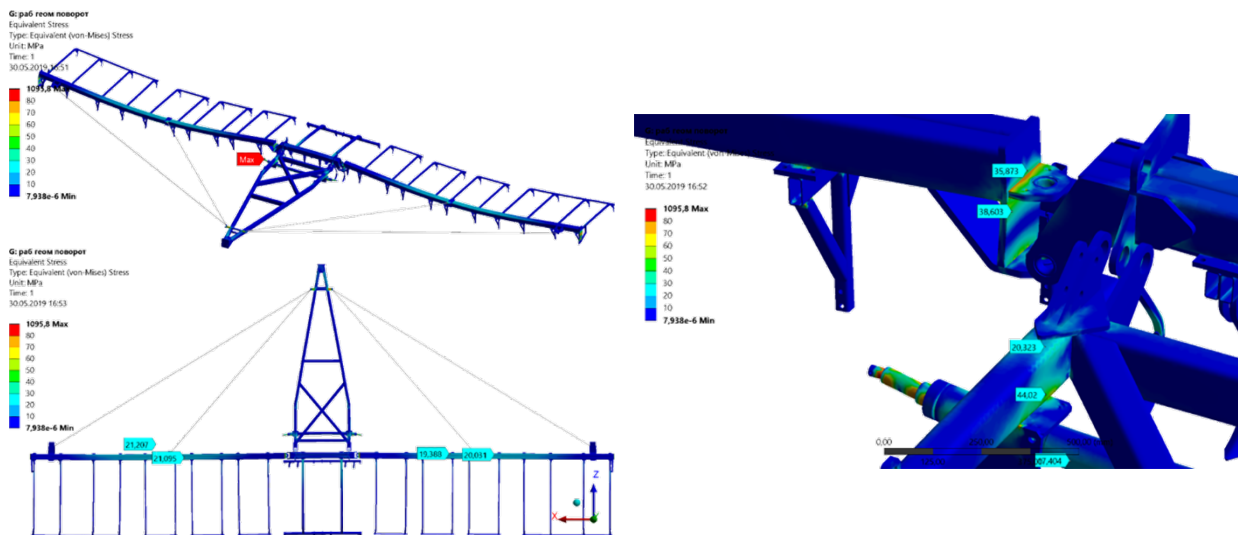


Рис. 19 – Розподіл еквівалентних напружень Мізеса

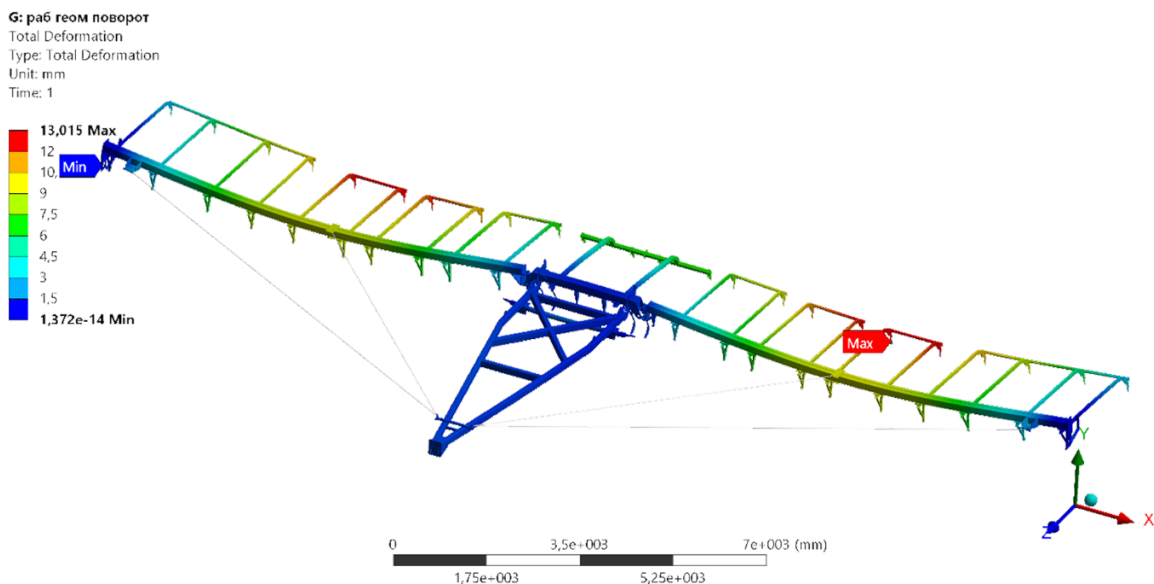


Рис. 20 – Розподіл сумарних переміщень

Перспективи подальших досліджень:

Проведення оптимізації рамних конструкцій навісного обладнання, яке може використовуватися для будівельно-дорожніх, сільськогосподарських машин та інших видах спецтехніки.

Висновки:

Проведені розрахунки напружено-деформованого стану рами зубної шлейф-борони ЛАРІ-21 показали, що для основного режиму характерні такі параметри міцності: коефіцієнт запасу 6,2 для наданого типу навантаження, за переміщеннями отримані результати знаходяться в рамках допустимих і не становлять небезпеки.

По переходам у транспортне положення коефіцієнт запасу міцності тримається лише на рівні не нижче 2,6, що стосується переміщень для рами бічний, всі вони перебувають у межах допустимих. По консолях, до яких кріпляться обробні конструктиви, то для всіх фіксованих кутів переміщення більше допустимих, можливо потрібно ввести додаткові зміцнення, зробити товщину самих балок більше.

Для режиму відхилення зусилля, що тягне коефіцієнт запасу міцності 5,7, переміщення знаходяться в межах норми.

Список використаних джерел:

1. Nicholas Valm, Navid Changizi, Mazdak Tootkaboni, Alireza Asadpoure, 2022. 'Topology optimization of imperfect frame structures with improved manufacturability', *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 123, 106869, ISSN 0020-7403, pp. 48-64.
2. Navid Changizi, Gordon P.Warn, 2020, 'Stochastic stress-based topology optimization of structural frames based upon the second deviatoric stress invariant', *Engineering Structures*, Volume 224, 111186, ISSN 0141-0296, pp. 7-15.
3. Zhao, L., Yi, J., Zhao, Z. et al., 2022, 'Topology optimization of frame structures with stress and stability constraints', *Struct Multidisc Optim* 65, 268, 12p.
4. Martin P. Bendsøe, Ole Sigmund, 2004, 'Topology Optimization Theory, Methods, and Applications, s.e., c.p.', *Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH*, ISBN 978-3-642-07698-5, 384p.
5. Aykut Kentli, 2020, 'Topology Optimization Applications on Engineering Structures', *Intech Open*, ISBN978-1-78985-322-3, 140p.
6. Artur Fernando de Vito Jr., W. M. Vicente, 2020, 'Structural Topology Optimization Applied to Scarifier Subsoiler', *Conference: XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC - University of Campinas, Brazil*, pp. 274-290.
7. Gabriel Gheorghe, Gheorghe Ganea, Cătălin Persu, Carmen Vasilachi, 2019, 'Optimization of the structure of a multifunctional soil tillage equipment in agricultural holdings', *Proceedings of 2019 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX November 13-15, Băile Govora, Romania*, ISSN 1454-8003, pp. 112-117.
8. Бледных В.В. Устройство, расчет и проектирование почвообрабатывающих орудий: пособие/ ЧГАА. - Челябинск, 2010, 214 с.
9. Василенко В.В. Расчет рабочих органов почвообрабатывающих машин. – Воронеж: ВГУ, 1994. – 288 с.
10. Егоров В.Г., Кленин Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: «КолосС», 2003. – 464 с.
11. Присекин В.Л. Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел/В.Л. Присекин, Г.И. Расторгуев. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - 228с.
12. Отчет по теме: «Прочностной расчет агрегата почвообрабатывающего Дукат-9 (ДЛМ 9) в основных эксплуатационных режимах» - Харьков, УПЭК, 2019 – 19 с.
13. Отчет по НИР «СХ8. Анализ НДС рамы ходовой бороны-луцильника ДЛМ-5» - Харьков, УПЭК, 2013 – 65 с.

References

1. Nicholas Valm, Navid Changizi, Mazdak Tootkaboni, Alireza Asadpoure, 2022. 'Topology optimization of imperfect frame structures with improved manufacturability', *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 123, 106869, ISSN 0020-7403, pp. 48-64.
2. Navid Changizi, Gordon P. Warn, 2020, 'Stochastic stress-based topology optimization of structural frames based upon the second deviatoric stress invariant', *Engineering Structures*, Volume 224, 111186, ISSN 0141-0296, pp. 7-15.
3. Zhao, L., Yi, J., Zhao, Z. et al., 2022, 'Topology optimization of frame structures with stress and stability constraints', *Struct Multidisc Optim* 65, 268, 12p.
4. Martin P. Bendsøe, Ole Sigmund, 2004, 'Topology Optimization Theory, Methods, and Applications, s.e., c.p.', *Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH*, ISBN 978-3-642-07698-5, 384p.
5. Aykut Kentli, 2020, 'Topology Optimization Applications on Engineering Structures', *Intech Open*, ISBN 978-1-78985-322-3, 140p.
6. Artur Fernando de Vito Jr., W. M. Vicente, 2020, 'Structural Topology Optimization Applied to Scarifier Subsoiler', *Conference: XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC - University of Campinas, Brazil*, pp. 274-290.
7. Gabriel Gheorghe, Gheorghe Ganea, Cătălin Persu, Carmen Vasilachi, 2019, 'Optimization of the structure of a multifunctional soil tillage equipment in agricultural holdings', *Proceedings of 2019 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX November 13-15, Băile Govora, Romania*, ISSN 1454-8003, pp. 112-117.
8. Blednykh V.V., 2010, 'Device, calculation and design of soil-cultivating tools: allowance', ChGAA, Chelyabinsk, 214 p.
9. Vasilenko V.V., 1994, 'Calculation of the working bodies of tillage machines', Voronezh: VGU, 288 p.
10. Egorov V.G., Klenin N.I., 2003, 'Agricultural and reclamation machines', Moscow, "Koloss", 464 p.
11. Prisekin V.L., Rastorguev G.I., 2010 'Fundamentals of the finite element method in the mechanics of deformable bodies', Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 228 p.
12. Report on the topic: "Strength calculation of the soil-cultivating unit Dukat-9 (DLM 9) in the main operating modes", Kharkov, UPEC, 2019, 19 p.
Report on research "SH8. Analysis of the SSS of the frame of the running harrow-cultivator DLM-5", Kharkiv, UPEC, 2013, 65 p.

Стаття надійшла до редакції 04 листопада 2022 року

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ОБОЛОНКИ ТЕПЛОВИДЕЛЯЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

© Буданов П.Ф., Хом'як Е.А.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Буданов Павло Феофанович (Буданов Павел Феофанович, Budanov Pavlo): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Хом'як Едуард Анатолійович (Хом'як Эдуард Анатольевич, Khomiak Eduard): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2579-2986> ORCID: e-mail: eakhomiak@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті показано, що в сучасних системах контролю герметичності оболонки (КГО) тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ) тепловиділяючої збірки ядерного реактора атомної електростанції, застосовуються різні методи контролю, які мають характерні недоліки, які не дозволяють визначати місцезнаходження, тип та розміри дефектів пошкодження та руйнування на поверхні оболонки ТВЕЛ. Показано, що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік нейтронів, що запізнюються, питома активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ. Виявлено, що для розрахунків оцінки критеріїв стану поверхні матеріалу оболонки, як правило, вводяться обмеження та припущення щодо геометричних припущень, що призводять до наближених і неточних характеристик у використовуваних системах КГО ТВЕЛ, оскільки не враховується структурно-фазовий стан структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, отже до зниження рівня надійності та безпеки при їх експлуатації. Проаналізовано, що застосування існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, для виявлення поверхневих та внутрішніх дефектів у вигляді локальної неоднорідності, мікро та макропор, різноманітних тріщин, відрізняється малою ефективністю, представляє трудомісткий процес, що вимагає додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ. Запропоновано в системах КГО ТВЕЛ ядерного реактора, застосувати принципово новий метод контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, з урахуванням сучасних наукових досягнень, на основі використання фрактально – кластерної теорії. Обґрунтовано, що в якості основи, пропонованого методу КГО ТВЕЛ, використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки та кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь розгерметизації ТВЕЛ, шляхом визначення місцезнаходження, типу і розміру дефектів пошкодження і руйнування поверхні оболонки ТВЕЛ. Запропоновано для реалізації та застосування фрактального методу контролю, провести удосконалення структурно-функціональної схеми системи КГО ТВЕЛ, шляхом впровадження інформаційно-вимірювального обчислювального модуля виявлення дефектів, який забезпечує обробку даних та їх передачу в автоматизовану систему управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції на основі розроблених етапів алгоритму фрактального методу, у яких визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності, для встановлення місця, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти ТВЕЛ.

Ключові слова: система контролю герметичності оболонки, тепловиділяючий елемент, фрактальна розмірність, етапи алгоритму фрактального методу

Budanov P., Khomiak E. “Improving the system for monitoring the tightness of the cladding of the fuel element of a nuclear reactor”

The article shows that in modern control systems for the tightness of the shell (KGO) of the heat-releasing element (TVEL) of the heat-releasing assembly of the nuclear reactor at the nuclear power plant, various control methods are used, which have characteristic shortcomings that do not allow determining the location, type and size of damage and destruction defects on the surface of the TVEL shell. It is shown that in all control methods currently used in KGO TVEL systems, only the activity of reference radionuclide groups in the coolant is directly determined: the flow of delayed neutrons, the specific activity of iodine isotopes, and the volume activity of radioactive noble gases, but not the degree of tightness of the shell TVEL. It was found that for the calculations of the assessment criteria of the surface condition of the shell material, as a rule, restrictions and assumptions are introduced regarding geometric increments, which lead to approximate and inaccurate characteristics in the used KGO TVEL systems, since the structural-phase state of the structure of the TVEL shell material is not taken into account, and, therefore, to a decrease in the level of reliability and safety during their operation. It was analyzed that the use of existing methods of controlling the surface of the TVEL shell material to detect surface and internal defects in the form of local heterogeneity, micro- and macropores and various cracks is characterized by low efficiency and seems to be a time-consuming process that requires additional surface treatment of the TVEL shell material. It is proposed to apply a fundamentally new method of controlling the surface quality of the material of the TVEL shell in the KGO TVEL systems of the nuclear reactor, taking into account modern scientific achievements, based on the use of the fractal-cluster theory. It is substantiated that the fractal properties of the structure of the shell material and the quantitative fractal value – the fractal dimension which allows determining the degree of depressurization of the TVEL by determining the location, type and size of the defects of damage and destruction of the surface of the TVEL shell, – are used as the basis of the proposed method of KGO TVEL. For the implementation and application of the fractal method of control, it is proposed to improve the structural and functional scheme of the KGO TVEL system by introducing an information and measurement computing module for detecting defects, which ensures data processing and their transfer to the automated system for controlling the technological processes of the power unit of the nuclear power plant based on the developed stages of the fractal algorithm of the method, in which the sequence of performing measurement and calculation operations for the calculation of fractal dimensionality indicators is defined, to establish the location, type and size of the defect on the axial segments of the TVEL height.

Keywords: shell tightness control system, heat-emitting element, fractal dimension, stages of the fractal method algorithm

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

На сьогоднішній день, при підвищенні потужності ядерного реактора (ЯР) атомної електростанції (АЕС), одним з основних завдань безпеки, є забезпечення контролю стану оболонок ТВЕЛ відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ТВЗ). Таким чином, контроль герметичності оболонок занурюваних відпрацьованих ТВЕЛ ТВЗ, фактично є першим етапом організації управління станом ядерного палива [1,2].

Система КГО ТВЕЛ займає найважливіше місце в системі радіаційної безпеки АЕС. Система КГО дозволяє, своєчасно виявляти розгерметизацію ТВЕЛ, що почалася, і відстежувати розвиток дефекту, запобігаючи, тим самим, важким аваріям і катастрофам. На жаль, існуючі системи КГО ЯР АЕС серії ВВЕР-1000, мають низьку ефективність і вимагають істотних витрат часу для проведення контролю.

В даний час на всіх діючих АЕС України з реакторами типу ВВЕР-1000 експлуатується штатна система КГО ТВЕЛ, розроблена ще наприкінці 60-х рр., яка морально та фізично застаріла [3-5].

У зв'язку з цим видається актуальним розробити нові методи контролю для систем КГО, які здатні визначати місце розташування, тип та розміри дефекту пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Аналіз основних причин і недоліків, існуючих систем КГО ТВЕЛ показав, що у всіх методах контролю, які на сьогодні застосовуються в системах КГО ТВЕЛ, безпосередньо визначається лише активність груп реперних радіонуклідів у теплоносії: потік нейтронів, що запізнюються, питома активність ізотопів йоду, об'ємна активність радіоактивних благородних (інертних) газів, а не ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ [6-10].

Взаємозв'язок детекторів і датчиків контролю систем КГО ТВЕЛ з параметрами пошкодженої оболонки ТВЕЛ, ґрунтується на розрахункових моделях, які не дають достовірної оцінки розміру пошкоджених дефектів, так вихід радіонуклідів у теплоносії, залежить від кількості, місця розташування та розміру наскрізної тріщини у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, система КГО ТВЕЛ, обмежена виміром активності реперних нуклідів у технологічних середовищах і не дозволяє, кількісно характеризувати ступінь герметичності оболонки ТВЕЛ [11-15].

У зв'язку з цим, є актуальним, розробити нові методи контролю для систем КГО ТВЕЛ, здатних визначати місце розташування, тип та розміри дефекту пошкодження та руйнування структури матеріалу оболонки ТВЕЛ. Тому, постає питання, щодо удосконалення систем КГО ТВЕЛ, на основі фрактального методу контролю та виявлення дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [16-18], розглянуто систему КГО ТВЕЛ, щодо газу, яка функціонує при роботі ядерних реакторів на швидких нейтронах на повній потужності та забезпечує:

- контроль сумарної активності захисного газу реактора з газової подушки;
- визначення ізотопного складу гамма-активних нуклідів у захисному газі;
- безперервний оперативний контроль появи та розвитку дефектів оболонки ТВЕЛ типу «газова нещільність»;

- передачу в автоматизовану систему радіаційного контролю (АСРК) та АСУ ТП енергоблоку АЕС, сигналів про перевищення контрольного та гранично допустимого рівнів негерметичності оболонок ТВЕЛ по газу.

На відміну від блоків детектування, що використовуються на АЕС в даний час, розроблена система КГО ТВЕЛ, дозволяє оперативно вимірювати об'ємну сумарну активність реакторного газу у всьому діапазоні очікуваних значень, а також ефективно виявляти газову розгерметизацію на ранній стадії за рахунком поділу складових активності, викликаних осколковими та активаційними радіонуклідами.

У роботі [19], розглянуто проблеми контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, при переході АЕС України на нові види ядерного палива. Аналіз сучасних методик систем КГО ТВЕЛ показав, що їм притаманні такі основні недоліки як, прихильність до ТВЕЛ, лише заздалегідь заданої геометрії, а також відсутність можливості визначення зміни інтервалу

між внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ та зовнішньою поверхнею таблетки ядерного палива. У зв'язку з цим, у роботі запропоновано удосконалення методики системи КГО ТВЕЛ, на основі врахування потужності сумарної активності радіонуклідів йоду в першому контурі ЯР АЕС. У той же час, як показує практика, за цією методикою проводиться врахування тільки поверхневого забруднення оболонки ТВЕЛ, навіть за відсутності негерметичних ТВЕЛ, що різко впливає на якісні та кількісні показники контролю пошкоджуючих дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

У роботі [20], дається опис проектованої системи КГО ТВЕЛ ядерного реактора АЕС. Пропонується метод локалізації ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ на працюючому ЯР АЕС, для скорочення часу пошуку дефектної ТВЗ на зупиненому реакторі. Метод заснований на використанні показань детекторів системи КГО ТВЕЛ по нейтронах, що запізнюються, і моделюванні розподілу теплоносія по петлях теплообміну. В основі методу лежить принцип індикації витоку продуктів поділу з пошкоджених оболонок ТВЕЛ в теплоносій. В якості реперних радіонуклідів обрані попередники нейтронів, що запізнюються. Осколки поділу – попередники нейтронів, що запізнюються, виходять в теплоносій у тих випадках, коли оболонка ТВЕЛ пошкоджена і паливо в місці пошкодження контактує з теплоносієм. Таким чином, вимірювання потоку нейтронів, що випускаються теплоносієм першого контуру в місцях розташування детекторів системи, дозволяє вести безперервний контроль за появою дефектів типу «контакт палива з теплоносієм» та їх розвитком.

У роботі [21] показано, що для виявлення дефектних ТВС, що містять негерметичні ТВЕЛ, на трубопроводах петель охолодження та на експериментальних петлевих каналах на виході з активної зони, встановлюються детектори нейтронів, що запізнюються (ДЗН), на основі іонізаційних камер поділу. Сигнали ДЗН подаються на вимірвальний пристрій, де виконується формування цифрового сигналу, що відповідає щільності потоку нейтронів від теплоносія (натрію) першого контуру та теплоносія, що циркулює експериментальними каналами. Таким чином, запропонований у роботі підхід до локалізації ТВС з негерметичними ТВЕЛ, на працюючому ядерному реакторі, дозволяє суттєво звузити область пошуку на зупиненому ЯР АЕС та скоротити час простою.

У роботах [22-24] проведено огляд методів контролю, які застосовують у системах КГО ядерних реакторів АЕС.

До них належать методи руйнуючого та не руйнуючого контролю: капілярні, радіографічні, радіохвильові, маспектрометричні, акустико-емісійні, ультразвукові, магнітні, вихорострумові дефектоскопії тощо.

Однак даним методам властиві характерні недоліки [25,26]:

- прийняті обмеження та припущення, щодо усереднення геометричних характеристик поверхні матеріалу;
- при накопиченні пошкоджень поверхні, враховується вплив зовнішніх пошкоджувальних дефектів;
- в якості основного фізичного процесу накопичення пошкоджень, як правило, розглядається процес повзучості матеріалу, без урахування структурно-фазових змін, характерних для реальних режимів експлуатації елементів;
- розрахунок пошкодження оболонки, що розраховується за граничними умовами, тільки для найнапруженішого радіального елемента в аналізованому аксіальному сегменті на поверхні матеріалу, що вносить значні усереднення та похибки у розрахунки.

Таким чином, на сьогоднішній день, недостатньо повно розроблені методи систем КГО для оцінки стану структури матеріалу оболонки з пошкодженою поверхнею, що потребує їх удосконалення.

Метою роботи є удосконалення системи контролю за герметичністю оболонки ТВЕЛ, як підсистеми автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції, для практичного застосування фрактального методу контролю, який підвищить точність та оперативність виявлення розгерметизації ТВЕЛ у порівнянні зі штатною методикою.

Виклад основного матеріалу

Проведемо аналіз сучасних систем контролю герметичності оболонки (КГО) тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ) тепловиділяючої збірки (ТВЗ) ядерного реактора (ЯР) атомної електростанції (АЕС).

Розглянемо завдання та вимоги до системи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000. Системи КГО ЯР на АЕС вирішують два основні завдання:

Перше завдання – визначення факту розгерметизації ТВЕЛ і оцінка масштабу дефекту на поверхні оболонки ТВЕЛ. На основі отриманої інформації приймається рішення про можливість або неможливість продовження роботи ядерного реактора АЕС.

Друге завдання – визначення місця розташування дефектних ТВЕЛ і ТВЗ. Як правило, на працюючому реакторі визначають область активної зони, в якій знаходиться дефект. Остаточний вибір дефектної ТВЗ виконується на зупиненому реакторі.

Основним застосуванням системи контролю герметичності оболонок ТВЕЛ (СКГО ТВЕЛ), є контроль стану (герметичності) оболонок ТВЕЛ, як в процесі експлуатації ядерного реактора (оперативна частина), так і на зупиненому реакторі, включаючи процес відмивання відпрацьованих ТВЗ (неоперативна частина). Система КГО, що забезпечує контроль цілісності базового бар'єру безпеки – оболонки ТВЕЛ, є системою важливою для безпеки класу ЗН або ЗНУ і входить до складу автоматизованої системи радіаційного контролю (АСРК) АСУ ТП енергоблоку АЕС.

Основною метою і завданням сучасної системи КГО, є підвищення ядерної і радіаційної безпеки експлуатації реакторної установки, зберігання відпрацьованого палива в басейні витримки та сприяння забезпеченню високих експлуатаційних показників енергоблоку АЕС за рахунок:

- контролю герметичності оболонок ТВЕЛ на всіх стадіях розвитку дефектів від газової нещільності до контакту ядерного палива з теплоносієм;
- контролю за вмістом в теплоносії першого контуру продуктів поділу палива;
- контролю за вмістом в газі першого контуру радіонуклідів осколкового і активаційного походження;
- видачі в АСРК і АСУ ТП енергоблоку АЕС для подання експлуатаційного персоналу інформації про значення вимірюваних параметрів;
- видачі в АСУ ТП сигналів про перевищення контрольного і гранично допустимого значень негерметичності оболонок ТВЕЛ;
- скорочення часу пошуку дефектних ТВЗ на зупиненому реакторі і запобігання вивантаження недовигорівших ТВЗ, що не містять дефектні ТВЕЛ;
- виявлення відпрацьованих ТВЗ з негерметичними ТВЕЛ в процесі відмивання і організації їх зберігання, з метою мінімізації забруднення води басейну витримки продуктами поділу палива.

Підвищені експлуатаційні вимоги до систем КГО реакторів на швидких нейтронах обумовлені тим, що нормативні межі пошкодження ТВЕЛ ядерних реакторів типу ВВЕР, істотно більш консервативні (в 4...10 разів) у порівнянні з межами, встановленими для інших типів реакторів.

Сучасні системи КГО, розробляються на основі багаторічного досвіду розробки і експлуатації систем КГО вітчизняних і зарубіжних реакторних установок на швидких нейтронах з натрієвим теплоносієм, із застосуванням сучасних спеціалізованих детекторів, блоків детектування, програмно-технічних засобів.

Сучасні системи КГО українських та зарубіжних реакторних установок, включають оперативні та неоперативні системи (підсистеми) КГО, як показано на рис. 1:

Системи КГО швидких реакторів типу ВВЕР-1000, включають оперативні системи (підсистеми) КГО:

ССКГО – секторальна система КГО по запізнілих нейтронах в теплоносії першого контуру;

ГКГО – система КГО за активністю газу в газовій порожнині реактора (газова система КГО);

НКГО – система КГО по активності радіонуклідів в теплоносії (натрію) першого контуру (натрієва система КГО).

Системи КГО швидких реакторів типу ВВЕР-1000, включають неоперативні системи (підсистеми) КГО:

СВДС-Р – система виявлення дефектних ТВЗ в активній зоні на зупиненому реакторі (реакторна система, поєднана з перевантажувальною машиною);

СВДЗ-ГО – система виявлення дефектних збірок в гнізді відмивання (позареакторна система);

ПТК КГО – програмно-технічний комплекс КГО;

СК – сервер комунікації з верхнім рівнем автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП) енергоблоку АЕС та автоматизованою системою радіаційного контролю (АСРК);

СЛБД – сервер локальної бази даних систем КГО та параметрів енергоблоку АЕС;

АРМО КГО – інтелектуальне автоматизоване робоче місце оператора-фахівця, що забезпечує комплексний підхід під час вирішення завдання КГО;

СУЗ – система управління та захисту.

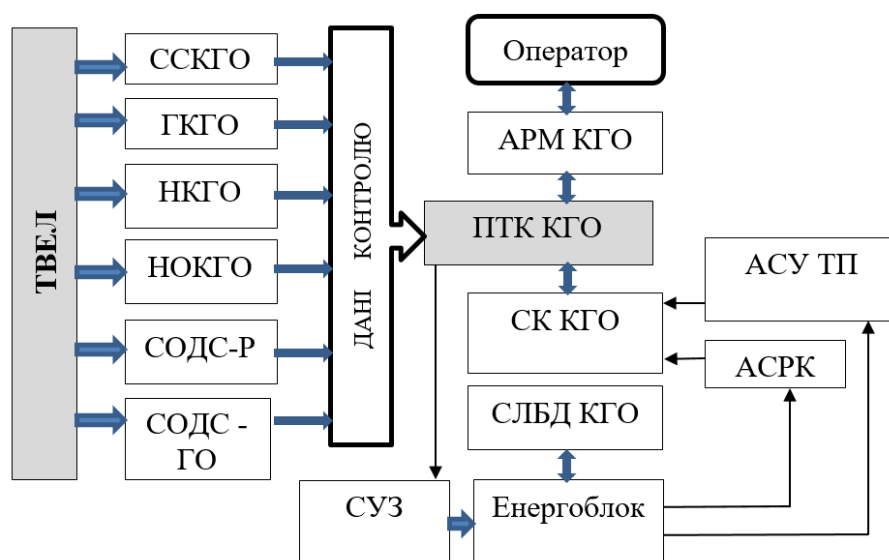


Рис. 1 – Структурна схема сучасної системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента

Розглянемо функції та завдання для виконання вимог, що пред'являються до оперативних підсистем СКГО.

Секторна система КГО (ССКГО) по нейтронах, що запізнюються в теплоносії першого контуру, функціонує при роботі реактора на потужності і повинна забезпечувати наступні функції і завдання:

- безперервний контроль щільності потоку нейтронів, що запізнюються, від теплоносія (натрію) першого контуру, що пройшов через різні області активної зони;
- виявлення наявності в активній зоні ТВЗ, що мають ТВЕЛ з дефектом «контакт палива з теплоносієм»;
- видачу в АСРК для подання оператору інформації про значення щільності потоку нейтронів, що запізнюються, по секторах активної зони і сигналів про перевищення контрольних і гранично допустимих значень щільності потоку запізнювальних нейтронів і швидкості її зростання;
- видачу в СУЗ аварійних сигналів при досягненні гранично допустимих значень щільності потоку нейтронів, що запізнюються, і швидкості її зростання.

На основі комплексного аналізу показань вимірювальних каналів ССКГО, розташованих у блоках детектування (БД) різних секторів активної зони ядерного реактора, на АРМ системи КГО, вирішується завдання виявлення та локалізації (орієнтовне визначення місця розташування) в активній зоні тепловиділяючих збірок, що мають негерметичні з палива ТВЕЛ.

Для підсистеми ССКГО, розглянемо застосовність методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, заснований на реєстрації нейтронів, що запізнюються, які випускають продукти поділу – попередники запізнювальних нейтронів, що потрапили в теплоносій через дефект в оболонці ТВЕЛ (рис. 2).

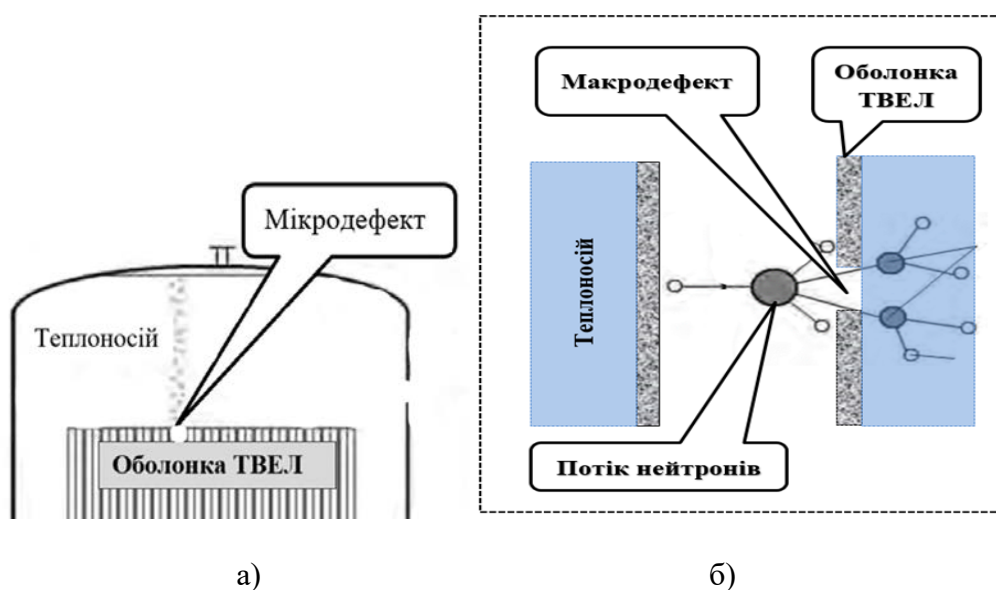


Рис.2 – Дефект типу: а) «газової нещільності»; б) «контакт ядерного палива з теплоносієм»

Розглянемо і проаналізуємо види дореакторного первинного контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, який відбувається перед завантаженням в ядерний реактор АЕС.

Контроль з використанням пробного газу: Пробний газ, як правило гелій, закачують всередину ТВЕЛ. При розгерметизації ТВЕЛ цей газ виходить з під оболонки і однозначно ідентифікує наявність дефекту. Цей метод використовується при виготовленні ТВЕЛ в якості основного методу контролю герметичності готових виробів. Реєстрацію витоку пробного газу проводять масс-спектрометричним детектором.

Контроль ультразвуковим методом: Принцип використання полягає в тому, що інтенсивність ультразвукових коливань, які пройшли через внутрішню порожнину ТВЕЛ (в області компенсаційного обсягу), пропорційна квадрату тиску газу, який в ньому знаходиться. Фірма KWU застосовує ультразвуковий контроль для виявлення негерметичних ТВЕЛ, газозбірник яких заповнений водою. Рівень сигналу від випромінюючого перетворювача до приймача зменшується при наявності води в газозбірнику. Також застосовується ультразвукове сканування поверхні ТВЗ в пеналах КГО.

Метод візуального контролю: Проводиться із застосуванням перископів, ендоскопів, кінокамер і телевізійних систем. Застосовується для ТВЗ ядерних реакторів, що мають безчехлову конструкцію і невелику кількість ТВЕЛ в пучках, також широко використовується в гарячих камерах.

Розглянемо та проаналізуємо види реакторного контролю герметичності оболонки ТВЕЛ, який відбувається при працюючому ядерному реакторі АЕС.

Специфічна особливість рішення задачі системи КГО на АЕС, полягає у відсутності прямого доступу до ТВЕЛ, тому висновок про порушення цілісності оболонки ТВЕЛ робиться побічно, за наявності продуктів поділу ядерного палива в теплоносії або газовій порожнині реактора ТВЕЛ. Періодичний контроль герметичності оболонок ТВЕЛ на працюючому реакторі типу ВВЕР здійснюється відбором проб теплоносія раз на місяць. При підозрі про наявність дефектної ТВЗ відбір проб проводиться раз на добу. Контроль проводиться по ^{131}I (йод). У даного ізотопу період напіврозпаду становить 8 діб, що дає час на проведення якісного виміру його активності.

Розглянемо і проаналізуємо сучасні методи КГО, які застосовуються для більшості типів реактора АЕС.

Метод контролю за активністю продуктів поділу в газовій порожнині реактора

У разі утворення мікродефектів в оболонці ТВЕЛ, газоподібні продукти поділу, виходять з-під оболонки і накопичуються в газовій порожнині. На наступній стадії розгерметизації (контакт ядерного палива з теплоносієм) стає помітним вихід в теплоносії короткоживучих продуктів поділу. Таким чином, система контролю продуктів поділу в газовій порожнині дозволяє відстежувати процес утворення дефекту оболонки ТВЕЛ на ранній стадії.

Метод контролю бета і гамма-активності теплоносія. Контроль здійснюється безпробовідбірним методом за допомогою радіометричної і спектрометричної апаратури. Зокрема, в складі комплексу апаратури контролю радіаційної безпеки (АКРБ) на АЕС з реакторами ВВЕР для цієї мети є пристрої детектування питомої активності йоду і криптону в теплоносії першого контуру, а також потоку запізнілих нейтронів з теплоносія в діапазоні від 10 до 1000 н/см²·с. Інформація цих пристроїв дозволяє контролювати стан оболонок ТВЕЛ працюючого реактора і стежити за динамікою їх розгерметизації. АКРБ дозволяє контролювати герметичність ТВЕЛ, але одержувана при цьому інформація дозволяє встановити тільки факт розгерметизації без визначення місцезнаходження пошкодженого ТВЕЛ. Однак за результатами вимірювання АКРБ можна встановити ступінь розгерметизації ТВЕЛ і прийняти рішення про можливість або неможливість експлуатації реактора АЕС.

Метод контролю за запізнілими нейтронами. Труднощі застосування методу контролю за запізнілими нейтронами полягає в тому, що при активації кисню утворюється ізотоп азоту $^{16}\text{O}(n,p)^{17}\text{N}$. Таким чином, ядра ^{17}N , перебуваючи в збудженому стані, зазнають розпаду і випускають запізнілі нейтрони, що спотворює результати вимірювання. Для вирішення даної проблеми застосовується буферна ємність, яка затримує теплоносії на 60 секунд. За цей час ядра азоту зазнають розпад. В результаті з'являється можливість

реєстрування запізнілих нейтронів від ізотопів I і Br. При установці системи КГО на кожному з головних циркуляційних петель стає можливим визначення сектора розташування дефектної ТВЕЛ.

В даний час цю систему замінили на систему контролю за гамма випромінюванням. На кожній циркуляційній петлі встановлюються датчик γ -випромінювання і спектрометри. Труднощі експлуатації даної системи полягають в тому, що при опроміненні кисню утворюється ізотоп ^{16}N з періодом напіврозпаду 7,1 секунд.

Мінімізувати його вплив на показання за допомогою буферної ємності досить важко, тому створюються електронні схеми для усунення даної проблеми. На ядерному реакторі дана проблема вирішується за допомогою методу співвідношення.

Основними нуклідами, попередниками запізнілих нейтронів, які надходять в теплоносій з негерметичних ТВЕЛ, є ізотопи бром і йоду. Для реєстрації запізнілих нейтронів на реакторах використовуються спеціалізовані датчики. На методі контролю за запізнілими нейтронами заснований принцип роботи ССКГО.

Метод контролю герметичності, заснований на реєстрації запізнілих нейтронів, які випускають продукти поділу – попередники запізнілих нейтронів, що потрапили в теплоносій через дефект в оболонці ТВЕЛ, показаний на рис. 3.

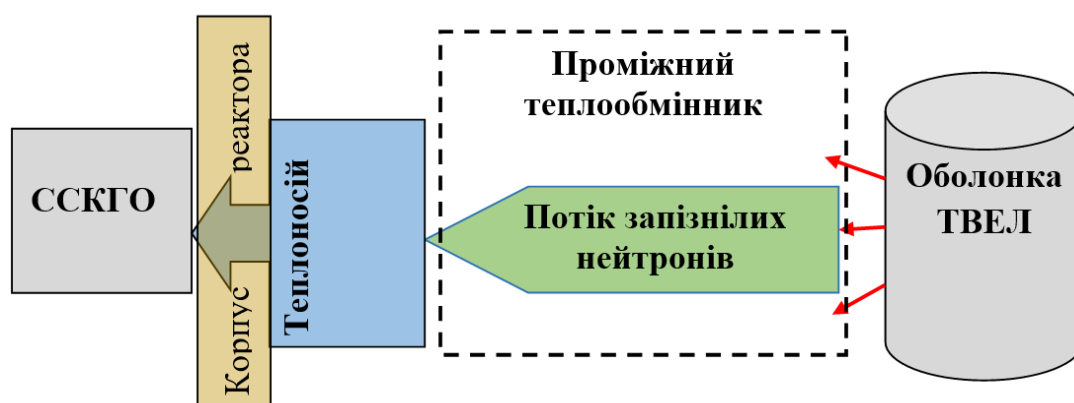


Рис. 3 – Принцип роботи секторної системи контролю герметичності оболонки

В якості детекторів запізнілих нейтронів у сучасних системах КГО, використовуються підвіски з іонізаційними камерами ділення, які розміщуються в блоках детектування (БД). Блоки детектування розміщуються або навпаки у вхідних вікнах проміжних теплообмінників в шахті реакторів бакового типу (БТ) або на трубопроводах першого контуру для корпусних реакторів. Для розміщення підвісок іонізаційних камер ділення (ПІК), призначений блок детектування, а також захисту іонізаційних камер від фонових гамма-випромінювання і підвищення чутливості реєстрації запізнілих нейтронів за рахунок їх уповільнення на матеріалах стінок БД. Для підвищення відмовостійкості секторної системи КГО використовувалися модернізовані БД, які дозволяють додатково знизити вплив фонових нейтронного випромінювання на показання ПІК.

Схема БД секторної системи КГО по запізнілих нейтронах реактора БН-800 представлена на рис. 4. Крім того, кількість підвісок в кожному БД збільшено з двох до трьох ПІК, відповідно застосовані три незалежні гілки реєстрації сигналів від попередників запізнілих нейтронів з мажоритарною схемою формування аварійного сигналу в СУЗ.

Недоліком даного методу можна вважати те, що сукупність дрібних дефектів може створити таку ж діагностичну картину, як один великий.

**Рис. 4** – Розташування блоків детектування ССКГО БН-800 і БН-600

Метод контролю з використанням пеналів КГО. Метод застосовується на зупиненому реакторі і дозволяє однозначно ідентифікувати дефектні ТВЕЛ і ТВЗ. В основу покладено принцип реєстрації активності продуктів поділу, що виходять через дефект в оболонці пошкодженого ТВЕЛ в вимірвальний об'єм пенала. Відпрацьована ТВЗ поміщається в герметичний пенал, у який подається вода.

Мікродефекти визначаються активністю газоподібних продуктів поділу, що виходять через дефект в газову порожнину пенала. Для інтенсифікації виходу газоподібних продуктів поділу, ТВЗ витримується в газовому середовищі пенала певний час з метою розігріву палива за рахунок залишкового тепловиділення.

Дефекти типу «прямий контакт з теплоносієм» діагностуються по активності продуктів поділу в воді. Критерієм наявності дефекту оболонки ТВЕЛ є перевищення результатів вимірювання встановлених меж.

Метод контролю з використанням пеналів КГО реалізується в такий спосіб. На реакторі ВВЕР-1000 знаходиться 4 герметичних пенала, розташованих в касетному відсіку басейну витримки.

Ці пенали, вміщують по одній ТВЗ та оснащені герметичною кришкою, яка закривається дистанційно. Завантаження і вивантаження ТВЗ в пенали проводиться перевантажувальною машиною під шаром води. ТВЗ поміщують у пенал, заповнений водою, і створюють надлишковий тиск. При наявності в оболонці ТВЕЛ дефекту, вода при підвищеному тиску надходить в зазор між оболонкою і паливом.

Деякий час тиск підтримують підвищеним, при цьому вода в зазорі під оболонкою насичується продуктами поділу. Потім тиск скидають, і «настояна» вода виходить в пенал, збільшуючи концентрацію продуктів поділу в воді пенала.

З пенала відбирають пробу води і визначають в ній концентрацію реперних нуклідів ^{131}I або ^{137}Cs . Виходи цих нуклідів з негерметичного ТВЕЛ в теплоносії працюючого реактора і в воду пенала пропорційні, тому визначення їх концентрації у воді пенала дозволяє судити про ступінь негерметичності оболонки і визначити мінімальну кількість ТВЗ, яке повинно бути видалено з активної зони реактора, щоб концентрація продуктів поділу в теплоносії не перевищувала допустимого значення.

Штатна система поканального КГО ТВЕЛ складається з 8 незалежних паралельних гілок, які обслуговують 4 барабана-сепаратора (БС) – по 2 гілки на один барабан сепаратор. Кожна гілка системи містить спеціальний візок з рейками, на якому закріплені вимірвальні датчики. При переміщенні візка вздовж гілки проводиться вимірювання активності теплоносія по γ -випромінюванню продуктів поділу та продуктів корозії.

Реєстрація та вивід сигналів системі поканального контролю ТВЕЛ проводиться в аналоговій формі протягом близько 30 хвилин після включення. При стабільному радіаційному стані активної зони реактора профілактичний поканальний контроль всіх ТВЗ в активній зоні реактора проводиться два рази на місяць.

Селекторний метод контролю. Для локалізації дефектних ТВЗ на реакторі ВВЕР застосовується селекторний метод. Активність теплоносія вимірюється послідовно на виході з кожного каналу у відповідних оптимальних енергетичних діапазонах спеціальним детектором, який у свинцевому захисті з колімаційними отворами переміщається автоматизованою системою уздовж технологічного ряду трубопроводів пароводяних комунікацій зліва і праворуч від кожного барабана-сепаратора. Перевищення значень активності заданої уставки є критерієм негерметичності ТВЕЛ в даному каналі, і оператор дає команду на вивантаження дефектної ТВЗ з реактора. За допомогою системи трубопроводів з кожної ТВЗ або з групи ТВЗ здійснюється відбір проби теплоносія. Проводиться спектрометричний аналіз проб і робиться висновок про виявлення дефектних ТВЕЛ. Даний метод застосовується також при визначенні місця розташування дефектних ТВЗ.

Для французького реактора ASTRID, робота системи КГО організована таким чином: відбір проби натрієвого теплоносія, проводиться над кожної ТВЗ, за допомогою пробовідбірних ліній і подається всередину вимірювальної ємності блоку детектування (рис. 5).

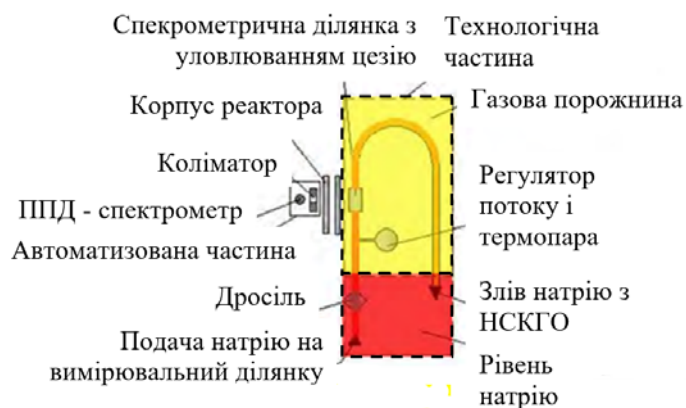


Рис. 5 – Натрієва система КГО перспективного натрієвого реактора

Вимірювальна ємність БД (об'ємом близько 3 літрів) оточена декількома сантиметрами свинцевою захисту і поліетиленовим сповільнювачем (рис. 6). В якості чутливих елементів вимірювальних каналів, використовуються гелієві пропорційні лічильники. Блоки детектування розташовані на корпусі ядерного реактора.

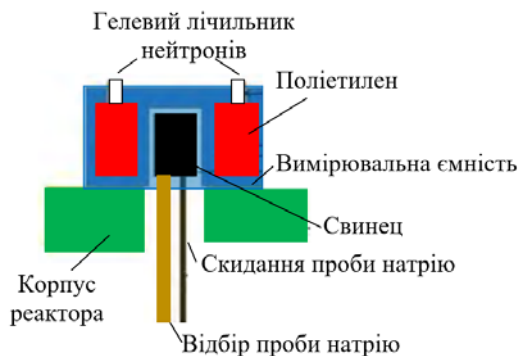


Рис.6 – Схема системи КГО з поліетиленовим сповільнювачем нейтронів в французькому реакторі ASTRID

В якості сповільнювача нейтронів для блоку детектування пропонується також використання графіту (рис. 7), так як в результаті його застосування, виключається утворення фотонейтронів, які вносять свій внесок в показання вимірювальних каналів системи КГО.

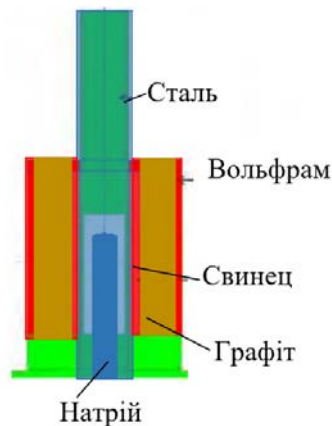


Рис.7 – Схема системи КГО з графітовим сповільнювачем нейтронів у французькому реакторі ASTRID

Водно-газовий метод контролю КГО на ВВР. На зарубіжних АЕС з реакторами типу ВВР в рамках методу з використанням пеналів КГО застосовується водно-газовий метод контролю. При проведенні КГО ТВЕЛ використовується повнопотоковий дегазатор, в який надходить вода з пенала, і де вона дегазується методом розпилення в повітряному середовищі. Виділення інертних радіоактивних газів (ІРГ) з води пенала може здійснюватися і за рахунок барботажа, для чого стиснене повітря подається в нижній патрубок пенала. Виділений з пенальної води, газ подається в проточний бета-радіометр, де проводиться вимір радіоактивності надходженого газового середовища. Недоліком методу є зниження точності за рахунок поверхневого забруднення ТВЕЛ радіонуклідами і великих часових витрат на проведення контролю.

Розглянемо удосконалення системи контролю за герметичністю оболонки тепловиділяючого елемента тепловиділяючої збірки ядерного реактора типу ВВЕР-1000.

Зроблений аналіз існуючих методів контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ показав, що їх застосування, для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (наприклад, локальні неоднорідності, мікро і макропори, різноманітні тріщини, осьова рихлість), відрізняється малою ефективністю, являє трудомісткий процес, який вимагає додаткової обробки поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Крім того, досліджені методи контролю поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, дозволяють візуально виявити тільки грубі зовнішні тріщини, «пояса», великі шлакові включення, дрібні тріщини і неметалеві включення невидимі під шаром окалини.

Виходячи з даних вищевикладених проблем, виникає доцільність розробки і застосування, принципово нових методів контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ з урахуванням сучасних наукових досягнень.

З позиції неруйнівного контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ, перспективним є використання теорії фракталів, фрактально-кластерного аналізу для розробки способів оцінювання якості поверхні оболонки з метою виявлення небажаних структурних змін (дефектів) поверхні і макроструктури матеріалу на всіх стадіях при експлуатації ТВЕЛ [27-28]. Тому, в роботі запропоновано, для оцінки якості поверхні матеріалу оболонки при її пошкодженні і руйнуванні, доцільність застосування розрахункового апарату, заснованого на методі теорії фракталів [29].

В якості основи, пропонованого методу контролю герметичності оболонки ТВЕЛ з використанням теорії фракталів, в роботі, запропоновано використовувати фрактальні властивості структури матеріалу оболонки і кількісну фрактальну величину – фрактальну розмірність, яка дозволяє визначити ступінь заповнювання об'єму структури матеріалу оболонки при розгерметизації ТВЕЛ [30, 31].

Для оцінювання якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ, розглянемо опис базового методу фрактально-кластерної теорії (МФКТ). Необхідно розглянути відмінні риси пропонованого методу МФКТ від існуючих методів контролю якості матеріалу оболонки ТВЕЛ. Це перш за все можливість створення цілком реалізованої автоматизованої системи оперативного виявлення дефектів оболонки на різних стадіях при експлуатації ТВЕЛ, як підсистеми в складі системи КГО АСУ ТП енергоблоку АЕС.

У роботі, для реалізації та застосування фрактального методу контролю, було розроблено варіант структурно-функціональної схеми удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента, яка включає до структурного складу – інформаційно-вимірювальний обчислювальний модуль виявлення дефектів, який забезпечить обробку даних та їх передачу до автоматизованої системи управління технологічними процесами енергоблоку атомної електростанції (АСУ ТП енергоблоку АЕС) на пульт автоматизованого робочого місця оператора (АРМо), як показано на рис. 8.

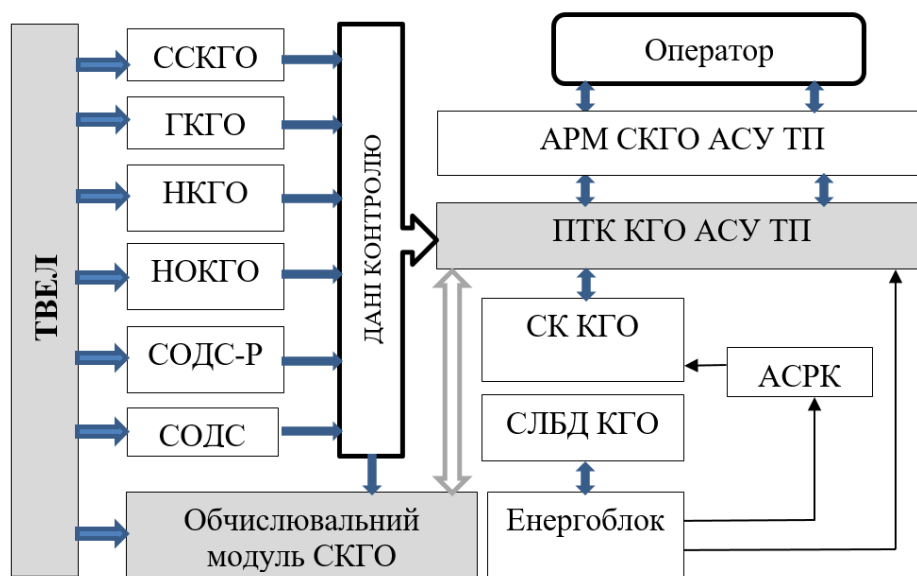


Рис. 8 – Структурна схема удосконаленої системи контролю герметичності оболонки тепловиділяючого елемента

При цьому, необхідно розробити і реалізувати алгоритм виконання запропонованого автоматизованого фрактального методу в складі математичного забезпечення автоматизованої системи оперативного контролю (АСОК) якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Для практичної реалізації фрактального методу контролю в системах КГО ТВЕЛ та забезпечення функціонування інформаційно-обчислювального модуля виявлення дефектів ТВЕЛ, у роботі була розроблена та запропонована блок-схема алгоритму (рис. 9), яка дозволяє:

– визначити показники фрактальної розмірності контуру дефектів на аксіальних сегментах висоті пошкодженої оболонки ТВЕЛ;

**Рис. 9** – Блок-схема алгоритму застосування фрактального методу СКГО ТВЕЛ

– отримати дані як про горизонтальні, так і вертикальні зміни в структурі матеріалу оболонки, а саме таких геометричних параметрів як: обсяг і площа поверхні, зовнішній і внутрішній діаметр, довжина і товщина оболонки;

– обробляти дані в режимі реального часу;

– розпізнавати мікроструктуру (локальні неоднорідності, мікро і макропори і тріщини, наскрізні тріщини) і на основі цього, визначати координати локального зовнішнього і внутрішнього дефекту в структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Алгоритм системи КГО у складі системи АСУ ТП енергоблоку АЕС, включає наступні етапи (рис. 9):

Етап №1: Вибір початкових умов;

Етап №2: Отримання даних, щодо зміни структури матеріалу оболонки ТВЕЛ;

Етап №3: Попередня обробка даних структури оболонки ТВЕЛ;

Етап №4: Визначення координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ, шляхом розрахунку величин фрактальної розмірності на аксіальних ділянках за висотою (довжиною) ТВЕЛ;

Етап №5: Фіксація координат передбачуваного дефекту оболонки ТВЕЛ, шляхом відбору величини фрактальної розмірності на аксіальній ділянці за висотою (довжиною) ТВЕЛ, що відповідає дефекту типу наскрізна тріщина;

Етап №6: Порівняння, у базі даних, показників фрактальної розмірності структури оболонки для еталонного герметичного та негерметичного ТВЕЛ;

Етап №7: Визначення місцезнаходження, типу та розміру дефекту в оболонці ТВЕЛ

Етап №8: Подання інформації з підсистеми АСОК до системи АСУ ТП енергоблоку АЕС про місце та розміри поверхневого дефекту та його вплив на рівень розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, у розробленому та запропонованому алгоритмі застосування автоматизованого методу фрактального контролю системи КГО ТВЕЛ, визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності для встановлення місцезнаходження, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти ТВЕЛ, а також подання інформації з підсистеми АСКО до системи АСУ ТП енергоблоку АЕС на автоматизоване робоче місце оператора-інженера АСУ, для оцінки ступеня герметичності або розгерметизації ТВЕЛ у складі тепловиділяючої збірки, для вироблення рішення на керування режимами роботи ядерного реактора АЕС.

Висновки

В результаті проведеного огляду та подальшого аналізу та удосконалення існуючих методів та систем контролю герметичності оболонок тепловиділяючих елементів, у роботі отримано наступні результати:

– удосконалено структурно-функціональну схему системи КГО, як підсистеми АСУ ТП енергоблоку АЕС.

– для визначення пошкоджуючих дефектів у структурі оболонки ТВЕЛ, запропоновано застосовувати спеціальний інформаційно-обчислювальний модуль системи КГО, для поєднання програмного забезпечення АСУ ТП енергоблоку АЕС.

– розроблено блок-схему алгоритму, для виконання запропонованого автоматизованого методу КГО у складі математичного забезпечення АСОК, для забезпечення контролю якості поверхні матеріалу оболонки ТВЕЛ;

– розроблені та запропоновані етапи алгоритму фрактального методу, в яких визначено послідовність виконання вимірювальних та обчислювальних операцій з розрахунку показників фрактальної розмірності для встановлення місця, типу та розміру дефекту на аксіальних сегментах висоти ТВЕЛ.

Список використаних джерел:

1. Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском : НП 306.2.143-2008 : затвердж. наказом Держатомрегулювання від 15.04.2008 №73 : зареєстр. Мін'юстом 09.06.2008 за № 521/15203. – Київ : ДКЯРУ, 2008. – 52 с.
2. Загальні положення безпеки атомних станцій : НП 306.2.141-2008 : затвердж. наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 №162 : зареєстр. Мін'юстом 25.01.2008 за № 56/14747. – Київ : ДКЯРУ, 2008. – 226 с.
3. Современные системы КГО перспективных реакторов на быстрых нейтронах / П. А. Дворников [и др.] // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2017. – № 2. – С. 2–12.
4. Богомолов В. Н. Алгоритм бездемонтажной проверки измерительных каналов секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реакторов типа БН / В. Н. Богомолов // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2018. – № 1. – С. 115–120.
5. Албутова О. И. Исследование зависимости показаний секторной системы контроля герметичности оболочек твэлов реактора БН-600 от эксплуатационных параметров / О. И. Албутова, Д. А. Лукьянов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 32–38.
6. Parga C. J. Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element / C. J. Parga, I. J. Rooyen, E. P. Luther // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Vol. 512. – P. 252–267. doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.028
7. A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods / J. Tang [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Vol. 110. – P. 492–500. doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.061.
8. Pelykh S. N. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control [Electronic resource] / S. N. Pelykh, M. V. Maksimov, V. E. Baskakov // Annals of Nuclear Energy. – 2013. – Iss. 58. – P. 188–197. – Access mode : <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6963>.
9. Yong S. Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants / S. Yong, Z. Linzi // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – Vol. 163. – P. 438–452. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.039>.
10. Philip B. A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins [Electronic resource] / B. Philip // Journal of Computational Physics. – 2015. – Vol. 286. – P. 143–171. – Access mode : <https://bit.ly/3fVSEt>.
11. Zheng Y. Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method / Y. Zheng // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – Vol. 88. – P. 437–460. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.06.060>.
12. Hyung M. S. Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery / M. S. Hyung, Y. S. Kune // Progress in Nuclear Energy. – 2011. – Vol. 53, iss. 7. – P. 825–830. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.026>.
13. Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation / R. K. Abdul, R. A. Afzal, A. D. Mohammed, M. K. Ramis // Progress in Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 111. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.10.013>.
14. Belles R. J. Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs) / R. J. Belles // Handbook of Small Modular Nuclear Reactors. – 2nd edn. – 2021. – P. 95–115. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823916-2.00005-9>
15. CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor / X. Shuang, Z. Xuhua, H. Gaojie, C. Xiaxin // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53, iss. 9. – P. 2847–2858. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.03.028>
16. Experience of commissioning of the sectoral monitoring tightness system of fuel elements claddings (SSKGO) of RF BN-600, RF BN-800 / P. A. Dvornikov, V. N. Bogomolov, S. N. Kovtun, A. A. Kudryaev // Book of Abstracts International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). – 2017. – P. 82.
17. Скоморохов А. О. Применение метода перекомпенсации для определения местоположения негерметичных сборок в реакторах на быстрых нейтронах / А. О. Скоморохов, Д. А. Лукьянов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2. – С. 39–43.
18. Локализация дефектных ТВС в активной зоне реактора БН-600 с помощью секторной системы КГО / А. С. Жилкин [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 1. – С. 83–91.
19. Питання контролю герметичності оболонок тепловидільних елементів із впровадження нових видів ядерного палива на атомних станціях України з реакторами ВВЕР-1000 / В. І. Богорад, Т. В. Литвинська, А. В. Носовський, О. Ю. Слєпченко // Ядерна та радіаційна безпека. – 2014. – № 1 (61). – С. 29–33.

20. Курский А. С. Методы контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов на корпусном кипящем реакторе ВК-50 / А. С. Курский, В. В. Калыгин, И. И. Семидоцкий // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 1–6.
21. Методы локализации дефективных ТВС в реакторе МБИР / П. А. Дворников, Д. А. Лукьянов, С. Н. Ковтун, С. С. Шутов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 24–34.
22. Удосконалення методу контролю оболонки тепловиділяючого елементу для підвищення безпеки ядерного реактора / К. Ю. Бровко, П. Ф. Буданов, Е. А. Хом'як, О. А. Тимошенко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність : зб. наук. пр. / Нац. тех. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – № 1 (1). – С. 26–31.
23. Коновалов И. И. Выявление факторов ускоренного накопления повреждений в оболочках ТВЭЛов, облученных в реакторе БН-600, неразрушающими методами контроля / И. И. Коновалов, В. В. Чуев, К. В. Митюрин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 171–180.
24. Воробьев Ю. Ю. Оценка применимости модели деформации оболочек ТВЭЛов для топлива реакторов ВВЭР-1000 / Ю. Ю. Воробьев, О. И. Жабин // Ядерная радиационная безопасность. – 2015. – № 3. – С. 3–7.
25. Розробка методу контролю оболонки ТВЕЛ для підвищення безпеки ядерного реактора / П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, С. Ф. Жуков, Е. А. Хом'як // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021. – Т. 32 (71), ч. 2, № 2. – С. 49–54.
26. Сучасні підходи та вимоги до методів контролю герметичності оболонки тепловидільного елемента / Е. А. Хом'як, П. Ф. Буданов, К. Ю. Бровко, І. Г. Кирисов // Вісник ВПІ. – 2022. – Вип. 3. – С. 11–16.
27. Федер Е. Фракталы [Электронный ресурс] / Е. Федер ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : УРСС : Ленанд, 2014. – 256 с. – Режим доступа : <http://www.prometeus.nsc.ru/acquisitions/15-04-14/conf01.ssi> (дата обращения 20.06.22).
28. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. – М. ; Ижевск : Ижев. ин-т компьютер. исслед., НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 656 с.
29. Балханов В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления [Электронный ресурс] / В. К. Балханов ; отв. ред. Ю. Б. Башкуев. – Улан-Удэ : Изд-во Бурят. госун-та, 2013. – 224 с. – Режим доступа : <http://ipms.bsnet.ru/publications/src/2013/FractGeomet.pdf> (дата звернення 20.06.22).
30. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / P. Budanov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – № 3/8 (111). – P. 75–89.
31. Development of a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear / P. Budanov [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – № 4 (8 (118)). – P. 60–70.

References:

1. Derzhatomrehuliuvannia 2008, *Pravyla yadernoi bezpeky reaktornykh ustanovok atomnykh stantsii z reaktoramy z vodoiu pid tyskom* : NP 306.2.143-2008, Derzhavnyi komitet yadernoho rehuliuvannia Ukrainy, Kyiv.
2. Derzhatomrehuliuvannia 2008, *Zahalni polozhennia bezpeky atomnykh stantsii* : NP 306.2.141-2008, Derzhavnyi komitet yadernoho rehuliuvannia Ukrainy, Kyiv.
3. Dvornikov, PA, Kovtun, SN, Kudriaev, AA, Lukianov, SS & Shutov, SS 2018, 'Sovremennyye sistemy KGO perspektivnykh reaktorov na bystrykh neutronakh', *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, no. 2, pp. 2-12.
4. Bogomolov, VN 2018, 'Algoritm bezdemontrazhnoi proverki izmeritelnykh kanalov sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktorov tipa BN', *Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii*, no. 1, pp. 115-120.
5. Albutova, OI & Lukianov, DA 2015, 'Issledovanie zavisimosti pokazanii sektornoj sistemy kontrolya germetichnosti obolochek tvelov reaktora BN 600 ot ekspluatatsionnykh parametrov', *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 32-38.
6. Parga, CJ, Rooyen, IJ & Luther, EP 2018, 'Fuel – clad chemical interaction evaluation of the TREAT reactor conceptual low-enriched-uranium fuel element', *Journal of Nuclear Materials*, no. 512, pp. 252-267.
7. Tang, J, Huang, M, Zhao, Y, Ouyang, X & Huang, J 2017, 'A new procedure for solving steady-state and transient-state nonlinear radial conduction problems of nuclear fuel rods', *Annals of Nuclear Energy*, vol. 110, pp. 492-500.
8. Pelykh, SN, Maksimov, MV & Baskakov, VE 2013, 'Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control', *Annals of Nuclear Energy*, iss. 58, pp. 188-197.
9. Yong, S & Linzi, Z 2022, 'Robust deep auto-encoding network for real-time anomaly detection at nuclear power plants', *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 163, pp. 438-452.
10. Philip, B 2015, 'A parallel multi-domain solution methodology applied to nonlinear thermal transport problems in nuclear fuel pins', *Journal of Computational Physics*, vol. 286, pp. 143-171.
11. Zheng, Y 2020, 'Predicting stochastic characteristics of generalized eigenvalues via a novel sensitivity-based probability density evolution method', *Applied Mathematical Modelling*, vol. 88, pp. 437-460.

12. Hyung, MS & Kune, YS 2011, 'Evolutionary design of reactor vessel assembly for liquid metal cooled battery', *Progress in Nuclear Energy*, vol. 53(7), pp. 825-830.
13. Abdul, RK, Afzal, RA, Mohammed, AD & Ramis, MK 2019, 'Effect of cladding on thermal behavior of nuclear fuel element with non-uniform heat generation', *Progress in Nuclear Energy*, vol. 111, pp. 1-14.
14. Belles, RJ 2021, 'Key reactor system components in integral pressurized water reactors (iPWRs)', *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*, 2nd edn, pp. 95-115.
15. Shuang, X, Xuhua, Z, Gaojie, H & Xiaxin, C 2021, 'CFD analysis of the flow blockage in a rectangular fuel assembly of the IAEA 10 MW MTR research reactor', *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53(9), pp. 2847-2858.
16. Dvornikov, PA, Bogomolov, VN, Kovtun, SN & Kudryaev, AA 2017, 'Experience of commissioning of the sectoral monitoring tightness system of fuel elements claddings (SSKGO) of RF BN-600, RF BN-800', *Book of Abstracts International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17)*, pp. 82.
17. Skomorokhov, AO & Lukianov, DA 2007, 'Primenenie metoda perekompensatsii dlia opredeleniia mestopolozheniia negermetichnykh sborok v reaktorakh na bystrykh neutronakh', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 39-43.
18. Zhilkin, AS, Gurev, SA & Osipov, SL 2011, 'Lokalizatsiia defektnykh TVS v aktivnoi zone reaktora BN 600 s pomoshchiu sektornoj sistemy KGO', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 1, pp. 83-91.
19. Bohorad, VI, Lytvynska, TV, Nosovskiy, AV & Slepchenko, OYu 2014, 'Pytannia kontroliu hermetychnosti obolonok teplovodylnykh elementiv iz vprovadzhennia novykh vydiv yadernoho palyva na atomnykh stantsiiakh Ukrainy z reaktoramy VVER-1000', *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no. 1(61), pp. 29-33.
20. Kurskii, AS, Kalygin, VV & Semidotskii, II 2014, 'Metody kontroliu germetychnosti obolochek teplovodylaiushchikh elementov na korpusnom kipiashchem reaktore VK-50', *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, no. 1, pp. 1-6.
21. Dvornikov, PA, Lukianov, DA, Kovtun, SN & Shutov, SS 2013, 'Metody lokalizatsii defektivnykh TVS v reaktore MBIR', *Izvestiia vuzov. Iadernaia energetika*, no. 3, pp. 24-34.
22. Budanov, PF, Brovko, KYu, Khomiak, EA & Tymoshenko, OA 2020, 'Udoskonalennia metodu kontroliu obolonky teplovodylnoho elementa dlia pidvyshchennia bezpeky yadernoho reaktora', *Visnyk Kharkivskoho politekhnichnogo instytutu*, no. 1, pp. 26-31.
23. Kononov, II, Chuev, VV & Mitiurev, KV 2011, 'Vyavlenie faktorov uskorennoho nakopleniia povrezhdenii v obolochkakh TVELov obluchennykh v reaktore BN-600 nerazrushaiushchimi metodami kontroliu', *Izvestiia vuzov Iadernaia energetika*, no. 2, pp. 171-180.
24. Vorobev, IuIu & Zhabin, OI 2015, 'Otsenka primenimosti modeli deformatsii obolochek TVELov dlia topliva reaktorov VVER-1000', *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, no. 3, pp. 3-7.
25. Budanov, PF, Brovko, KYu, Zhukov, SF & Khomiak, EA 2021, 'Rozrobka metodu kontroliu obolonky TVEL dlia pidvyshchennia bezpeky yadernoho reaktora', *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnogo universytetu imeni VI Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky*, vol. 32 (71), part 2, no. 2, pp. 49-54.
26. Khomiak, EA, Budanov, PF, Brovko, KYu & Kyrsov, IH 2022, 'Suchasni pidkhody ta vymohy do metodiv kontroliu hermetychnosti obolonky teplovodylnoho elementa', *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu*, iss. 3, pp. 11-16.
27. Feder, E 2014, *Fraktalyi*, 2nd edn, URSS, Lenand, Moskva.
28. Mandelbrot, B 2010, *Fraktalnaya geometriya prirody*, Izhevskiy institut kompyuternykh issledovaniy, Nauchno-issledovatel'skiy tsentr Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, Moskva, Izhevsk.
29. Balkhanov, VK 2013, *Osnovy fraktalnoj geometrii i fraktalnogo ischisleniya*, Izdatel'stvo Buryatskogo gosuniversiteta, Ulan-Ude.
30. Budanov, P, Kyrsov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory', *Eastern-European Journal of Enterprise Thechnologies*, no. 3/8 (111), pp. 75-89.
31. Budanov, P, Khomiak, E, Kyrsov, I, Brovko, K, Kalnyi, S & Karpenko, O 2022, 'Development of a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 4 (8 (118)), pp. 60-70. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374>

Стаття надійшла до редакції 05 листопада 2022 року

АЛГОРИТМ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПУ

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

¹*Українська інженерно-педагогічна академія*

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

Інформація про авторів:

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

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

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

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

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

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

В статті запропоновано структурну схему системи управління точністю обробки для токарного верстата з числовим програмним управлінням (ЧПУ), застосовуючи для цього алгоритм керування, що ґрунтується на статистичному прогнозуванні. Схема системи управління можна застосувати до різних верстатів з різними системами ЧПУ, головна умова, щоби система ЧПУ дозволяла підключення сторонньої електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). В статті розглянуто на прикладі верстата 16K20Ф3 з допомогою системи управління ЧПУ 2P22, застосування схеми управління точності та її математичне забезпечення, що включає у собі як алгоритми обчислення величин корекції, так і процедури вибору оптимальної послідовності. Окремо розглянуто етапи оцінювання точності та представлено докладні алгоритми «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» та «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів». В результаті проведених досліджень автоматичного підналагодження за алгоритмом управління точністю обробки виявлено, що вихідна послідовність розмірів деталей (тобто розмірів деталей, виготовлених з підналагодженням) має постійне середнє значення, мало відрізняється від заданого розміру, і кореляційну функцію незначно відмінну від нуля, що свідчить про повне вичерпання можливостей подальшого підвищення точності обробки методами автоматичної налагодження, тобто шляхом використання інформації про розміри раніше оброблених деталей.

Ключові слова: точність обробки, токарний верстат, системи управління точністю, автоматичне налагодження.

Hrinchenko H., Teslov O., Kozlov M., Marchenko O., Zakharov S., Herasymov Ye. “Design algorithm of systems for automatic control of mechanical processing accuracy on CNC machines”.

The article proposes a structural diagram of the processing precision control system for a CNC lathe, using a control algorithm based on statistical forecasting. The scheme of the control system can be applied to different machines with different CNC systems; the main condition is that the CNC system allows the connection of a third-party electronic computer (EC). Using the example of a 16K20F3 machine with the help of a 2P22 CNC control system, the application of the accuracy control scheme and its mathematical support, which includes both algorithms for calculating correction values and procedures for choosing the optimal sequence, is considered in the article. The stages of accuracy assessment are considered separately, and the detailed algorithms "Estimation of tuning error and confidence limits" and "Determination of the scope of independent random factors" are presented. As a result of the conducted research on automatic sub-tuning according to the processing precision control algorithm, it was found that the original sequence of part sizes (that is, the sizes of parts manufactured with sub-tuning) has a constant average value, slightly different from the specified size, and a correlation function slightly different from zero, which indicates a complete exhaustion of possibilities of a further increase in the accuracy of processing by automatic debugging methods, i.e. by using information about the dimensions of previously processed parts.

Keywords: machining accuracy, lathe, precision control systems, automatic debugging.

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

Підвищення вимог до точності виготовлення деталей у процесі масового виробництва викликають необхідність застосування систем автоматичного регулювання розмірів, так як при фіксованому налаштуванні металорізальних верстатів існує деяке розсіювання розмірів деталей, яке характеризується значеннями миттєвого математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення.

Застосування систем регулювання розмірів має сенс у тому разі, коли у процесі виробництва разом із випадковим розсіянням розмірів спостерігається закономірне систематичне зміщення у часі розмірів деталей. Ця зміна розмірів є закономірною функцією від порядкового номера деталі. З метою збереження значення математичного сподівання в заданих межах, необхідно піддавати регулюванню рівень розмірного налаштування.

Систематична складова, як правило, не може бути визначена заздалегідь, але її величина для кожної деталі може бути оцінена на підставі статистичної обробки інформації результатів вимірювань попередніх деталей, що належать до тієї ж партії. На підставі такої оцінки можна провести регулювання обладнання для найбільш ефективного зменшення відхилення розміру даної деталі від заданого номіналу. Мета такого регулювання – утримання центру групування контрольованого розміру у заданому інтервалі.

При проектуванні систем автоматичного управління необхідно визначити спосіб формування імпульсу підналагодження для подачі команди виконавчому механізму верстата. Так, застосовуючи різні способи формування сигналів на підналагодження та варіюючи величинами регулювальних імпульсів, можна істотно змінити характер сумарного розподілу розмірів, майже не змінюючи зони розсіювання.

Відомо, що до сумарної похибки виготовлення циліндричної деталі входять: похибка налаштування; випадкова складова, яка пов'язана з внутрішньою мінливістю верстата і систематична складова похибки обробки, яка пов'язана зі зносом ріжучого інструменту, повільною зміною температури та ін. Тому для максимально точного прогнозування похибки механічної обробки та своєчасного введення поправки на взаємне положення інструменту і заготівлі необхідно застосовувати таку систему управління, яка зможе керувати цими трьома складовими похибки виготовлення деталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автоматична підналагодження полягає у коригуванні положення інструменту на величину очікуваного відхилення розміру в циклі механічної обробки. Очікуване відхилення розміру, тобто коригуючий або підналагоджувальний імпульс, обчислюється за результатами вимірювань розмірів раніше оброблених деталей, із запізненням не менш ніж на один цикл обробки. Наявність випадкової складової у відхиленнях розмірів змушує використовувати для обчислення підналагоджувального імпульсу методи статистичного прогнозування. Ефективність автоматичної підналагодження значною мірою залежить від точності зазначеного прогнозування, що визначається за інших рівних умов досконалістю застосовуваного алгоритму. Тому синтез оптимальної системи автоматичного управління точністю обробки (САУТО) зводиться, зрештою, до синтезу алгоритму обчислення підналагоджувального імпульсу.

Існуючі методи вирішення завдань з вибору оптимального алгоритму підналагодження засновані на ймовірнісному підході до аналізу процесу автопідналагодження. Найбільш докладний виклад зазначених рішень міститься в роботах [1, 2], де більшість розглянутих методів автоматичного підналагодження засновані на використанні припущення про лінійний характер зміщення налаштування інструменту відносно поверхні деталі. Метою застосування зазначених методів є зменшення розсіювання розмірів деталей до заданої величини, яка досягається шляхом періодичної корекції положення інструменту в тих випадках, коли розміри деталей доходять до межі поля допуску. Між підналагоджувальними межами розташовується зона нечутливості. Інформація про розміри всередині цієї зони для керування залишається не використаною, тому такі методи не забезпечують досягнення максимальної точності обробки, або застосовуються при виготовленні деталей грубих квалітетів точності.

У роботі [3] викладається метод пульсуючого підналагодження, при якому обидві межі підналагодження зведені в одну, чим ліквідується зона нечутливості, а підналагодження здійснюється на кожному кроці імпульсом, постійним за величиною та змінним за знаком. Цей метод, забезпечує найбільш повну компенсацію систематичної складової та призводить до збільшення випадкової складової похибки механічної обробки.

Подальший розвиток методів автоматичного підналагодження пов'язаний із забезпеченням максимальної для даних умов точності механічної обробки. При цьому зберігалася запропонована для пульсуючого підналагодження суміщена підналагоджувальна межа (звичайно - середина поля допуску). Підвищення ефективності підналагодження досягалось з застосуванням підналагоджувального імпульсу, змінного як за знаком, так і у величині.

Оптимальне підвищення точності обробки за рахунок компенсації випадкового зміщення налаштування незалежно від лінійного тренду (його в ряді випадків може і не бути) розглянута в роботі [4], де використані методи статистичного прогнозування, а потім у роботі [1], виконаної на основі застосування теорії оптимальних систем. Таким чином, вже наявні (раніше відомі і нові) результати в галузі оптимального автоматичного підналагодження дозволяють компенсувати величину тренду або випадкове зміщення налаштування. Однак слід зазначити, що відповідні алгоритми автоматичного підналагодження у всіх зазначених вище роботах отримані при накладенні досить жорстких обмежень на властивості вихідного процесу у вигляді його статистичних характеристик.

У роботах [1, 5] параметри алгоритму підналагодження пов'язані з класом випадкового процесу, що апроксимує послідовність розмірів заготовок, оброблених без підналагодження. У вказаних роботах розглядалися процеси з незалежними прирощеннями, стаціонарні процеси з кореляційною функцією певного виду або дельта-корельовані

випадкові послідовності, накладені на лінійний тренд, і т. д.. У роботі [5] прийняті апріорно відомими параметри лінійного тренду. Таким чином, у більшості випадків, завдання синтезу систем автопідналагодження вирішується у припущенні наявності повної апріорної інформації.

Подальший розвиток методів автоматичної підналагодження пов'язано, в першу чергу, з розширенням можливостей (універсалізацією) алгоритмів, тобто з наданням їм здібностей компенсувати одночасно як довільні тренди, так і випадкові зміщення налаштування. При цьому система автоматичного підналагодження повинна залишатися прийнятною, у вказаному вище сенсі, у всьому діапазоні можливих значень параметрів некерованого процесу (його трендів та кореляційних функцій). Одним із шляхів вирішення такої задачі, як відомо, є надання системі управління адаптивних властивостей, за наявності яких структура (або параметри) алгоритму змінюються в залежності від оцінки якості результатів управління [6]. Цей шлях використаний у роботі [1], де параметри алгоритму уточнюються в залежності від поточної оцінки дисперсії розмірів деталей, оброблених з підналагодженням, та в роботі [7], де уточнення алгоритму (або самонавчання системи автоматичного підналагодження) проводиться за величиною відхилень від нуля поточних значень коефіцієнта кореляції між розмірами "підналагоджених" деталей.

Проте надання системі управління адаптивних властивостей супроводжується як істотним її ускладненням так і подорожчанням, що призводить до появи більш менш тривалих періодів неоптимальної роботи системи (періодів адаптації), протягом яких у ній здійснюються аналіз результатів підналагодження та підстроювання параметрів алгоритму. Тому застосування систем з адаптивними властивостями є крайнім випадком, коли доступні кошти не здатні забезпечити прийнятність системи автоматичного налагодження.

Провівши літературний огляд робіт, присвячених питанням забезпечення точності механічної обробки в машинобудуванні показав, що точність виготовлення деталей при точінні залежать від багатьох чинників, які поділяють на три категорії: систематичні постійні, систематичні закономірно змінювані та випадкові. Відомо, що при зміні хоча б одного з чинників згодом зазвичай призводить до не стаціонарності процесу. Однак, дослідження точності та методи забезпечення точності обробки при точінні проводилися з припущенням, що процес стаціонарний.

Більшість існуючих алгоритмів управління САУТО придатні лише для особливо стабільного виробництва, оскільки побудовані в припущенні, що характеристики факторів, що діють на вході технологічної системи (ТС), та сигналів, що виходять з неї, відомі та незмінні в часі, тобто має місце повна та апріорна визначеність. Найчастіше зазначені характеристики ТС невизначеним чином змінюються у часі, та й залишаються неконтрольованими. У зв'язку з цим синтез САУТО для нестабільних процесів має здійснюватися з урахуванням нестійкості вхідних параметрів.

Метою роботи є підвищення точності виготовлення деталей на основі прогнозування з застосуванням систем автоматичного управління точністю обробки.

Виклад основного матеріалу

Запропонуємо структурну схему системи управління точністю обробки для токарного верстата з числовим програмним управлінням (ЧПУ), застосовуючи для цього алгоритм керування, що ґрунтується на статистичному прогнозуванні. У межах цієї статті обмежимося верстатом 16K20Ф3 з допомогою системи управління ЧПУ 2P22, але таку схему можна застосувати до різних верстатів з різними системами ЧПУ, головна умова, щоби система ЧПУ

дозволяла підключення сторонньої електронно-обчислювальної машини (ЕОМ). Сучасні ЕОМ з їхньою швидкістю дозволяють підключатися до систем верстатів з ЧПУ, і обробка статистичної інформації не впливає на продуктивність обладнання. Пропонується наступна структурна схема системи автоматичного управління точністю механічної обробки (рис. 1).

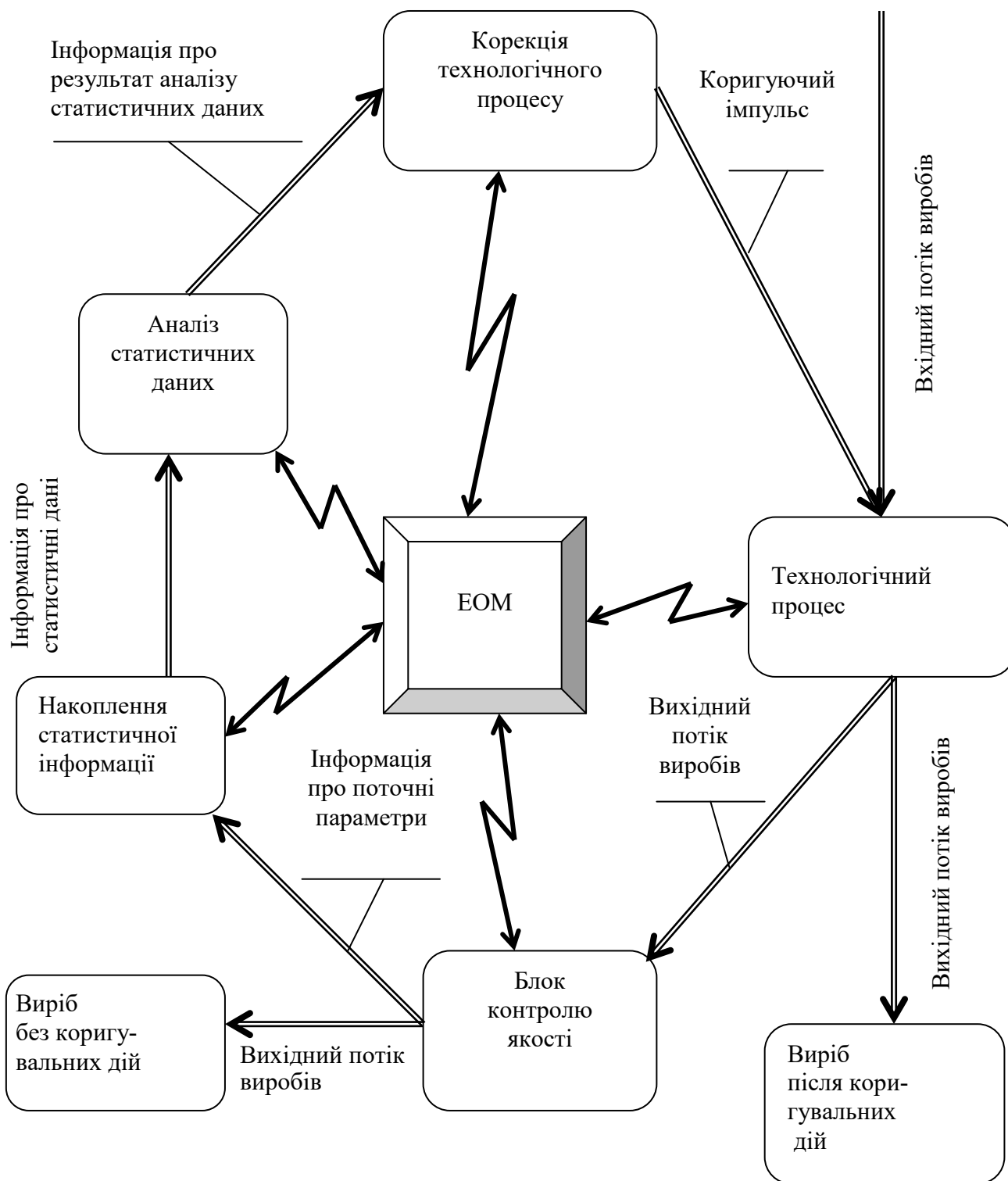


Рис. 1 – Структурна схема системи автоматичного керування точністю обробки

Як відомо, програмне управління верстатами не передбачає автоматичної компенсації похибки механічної обробки від теплових деформацій, зносу інструменту та від неконтрольованих факторів на вході системи «верстат – пристосування – інструмент - деталь» (ВПД). Відповідні корекції а також початкове налаштування верстата на заданий розмір здійснюється вручну за результатами вимірювань традиційними засобами, що перешкоджає здійсненню повністю автоматизованого процесу обробки на верстатах з ЧПУ, який не потребує участі людини – оператора.

З метою автоматизації операцій вироблення та внесення до керуючої програми корекції розроблено систему автоматичного управління точністю обробки на верстатах з ЧПУ. Сучасні тенденції широкого застосування міні та мікро ЕОМ, у складі пристроїв ЧПУ, роблять завдання алгоритмічного забезпечення автоматичного управління точністю на верстатах з ЧПУ особливо актуальним, оскільки міні ЕОМ створюють можливість використання найбільш ефективних алгоритмів САУТО, без додаткового ускладнення як пристрою ЧПУ, так і САУТО. У цьому полягає перша і основна особливість управління точністю на верстатах з ЧПУ.

При відносно грубих вимогах до точності існуюча апіорна інформація може виявитися достатньою для прийняття остаточного рішення щодо вибору варіанту управління. Наприклад, миттєве розсіювання розмірів деталей істотно менше поля допуску виготовлення, можна застосувати підналагодження із заздалегідь заданим (постійним) коефіцієнтом корекції. При підвищенні вимог до точності, вірніше, при наближенні необхідної точності до граничних меж поля допуску, може знадобитися уточнення коефіцієнта корекції в процесі налагодження або вимірювання розміру. Тому математичне забезпечення управління точністю на верстатах з ЧПУ має включати у собі як алгоритми обчислення величин корекції, так і процедури вибору оптимальної послідовності.

Перший етап розробки такого математичного забезпечення вимагає складання математичних моделей похибок обробки для типових технологічних ситуацій, які є основою розробки алгоритмів обчислення корекції за результатами вимірювань. Для цього необхідно попередньо підготувати перелік та опис зазначених ситуацій. На наступному етапі розробляється алгоритм функціонування системи управління точністю, тобто складається формалізоване опис процесів управління, що включає процедури вибору оптимальної послідовності операцій управління. Ці два етапи є досить універсальними; їх результати не прив'язуються до будь - якої конкретної системи ЧПУ, що дозволяє в повному обсязі здійснювати автоматичне керування точністю.

Розглянемо докладно універсальний алгоритм керування точністю обробки. Цей алгоритм зображено у вигляді блок-схеми наведеної на рис.2.

Отже алгоритм складається з 14-ти поступових етапів та полягає у наступному:

1. Початок програми "Алгоритм управління точністю обробки".
2. Введення статистичних даних. Статистичними даними для певних умов технологічного процесу є вибірки вимірювань розмірів контрольованої поверхні деталей у порядку виготовлення між двома переналагодженнями. Для надійної оцінки потрібно 3-5 вибірок. Статистичні дані необхідно вводити як відхилень від середнього розміру деталі.

3. Підпрограма "Оцінка процесу на стаціонарність"; Оцінку процесу на стаціонарність провадимо двома критеріями: критерієм "серій" та критерієм "тренду", за методикою, запропонованою у [9].

4. Блок порівняння. Якщо процес стаціонарний, то перехід до блоку 5, якщо ні, то до блоку 8.

5. Побудова математичної моделі. У цьому блоці визначаються параметри перехідної матриці та будується перехідна матриця відповідно до методики [8].

6. Підпрограма "Прогнозування відхилення розміру на n кроків вперед". Відповідно до методики [10] визначається вектор рядок ймовірностей знаходження процесу в шести зонах поля розсіювання розмірів на n кроків вперед.

7. Підпрограма «Визначення часу досягнення меж поля допуску». Відповідно до методики [11] визначається математичне очікування та дисперсія виходу процесу за межі поля допуску.

8. Побудова математичної моделі похибки виготовлення.

9. Підпрограма «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів» (рис. 3). Відповідно до методики [12] визначається час тривалості технологічного процесу, протягом якого на похибку виготовлення не впливають систематичні фактори, а розсіювання розмірів визначається впливом випадкових факторів.

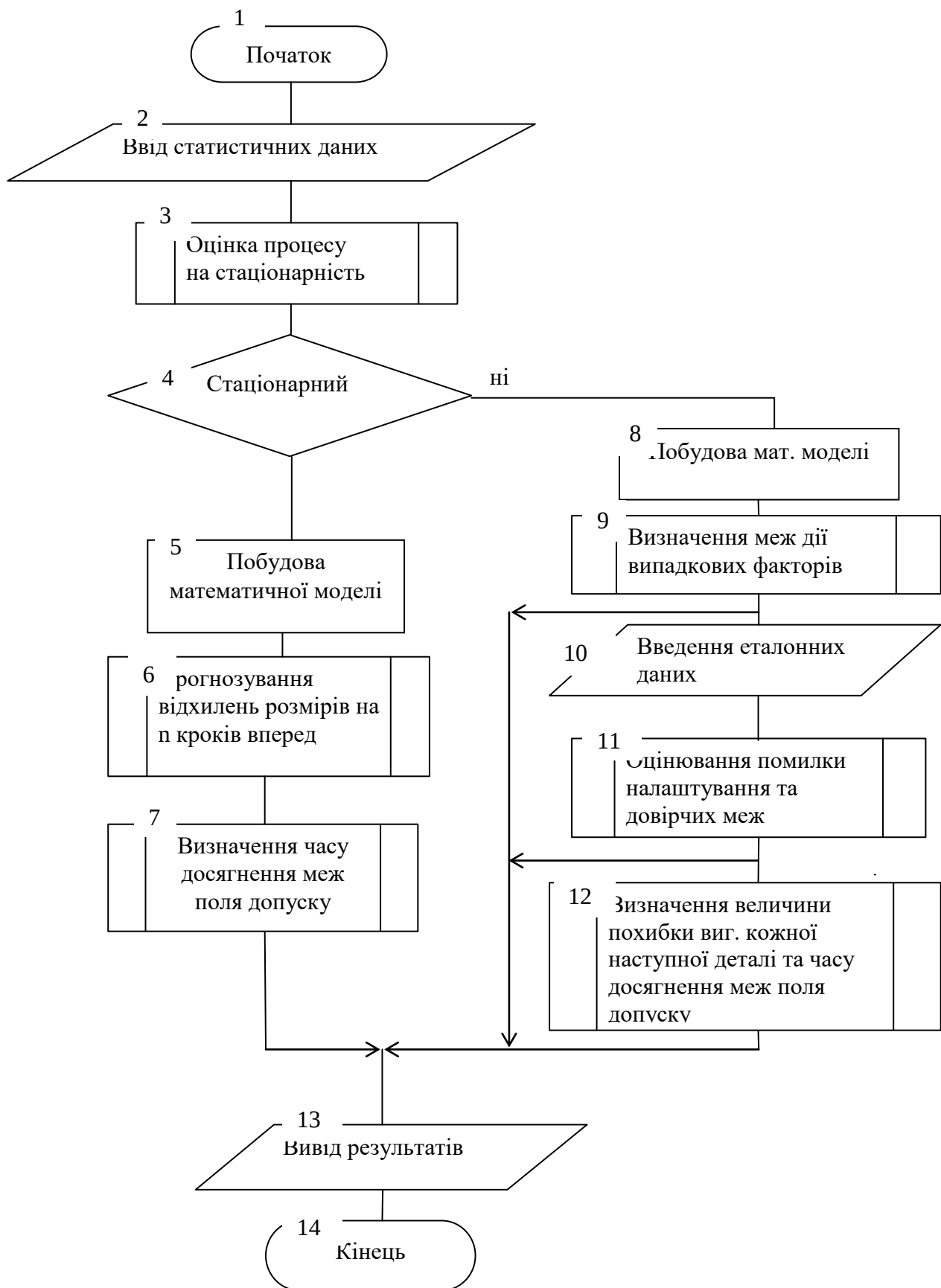
10. Введення вибірки без помилки налаштування. Для цього необхідно провести експеримент із вимірювання контрольованого розміру в спеціальних умовах, де помилка налаштування мінімальна або дорівнює нулю.

11. Підпрограма «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» (рис.4). Відповідно до методики [13] визначається помилка налаштування виготовлення деталей на розмір та її довірчих кордонів.

12. Підпрограма «Визначення величини похибки виготовлення кожної наступної деталі та часу досягнення меж поля допуску». Відповідно до методики [13] визначається величина систематичної складової, присутньої при обробці кожної наступної деталі.

13. Виведення результатів.

14. Кінець програми.

**Рис. 2** – Універсальний алгоритм керування точністю обробки

Докладно алгоритми «Оцінка помилки налаштування та довірчих меж» та «Визначення сфери дії незалежних випадкових факторів» зображені у вигляді блок-схем на рис. 3 та рис. 4.

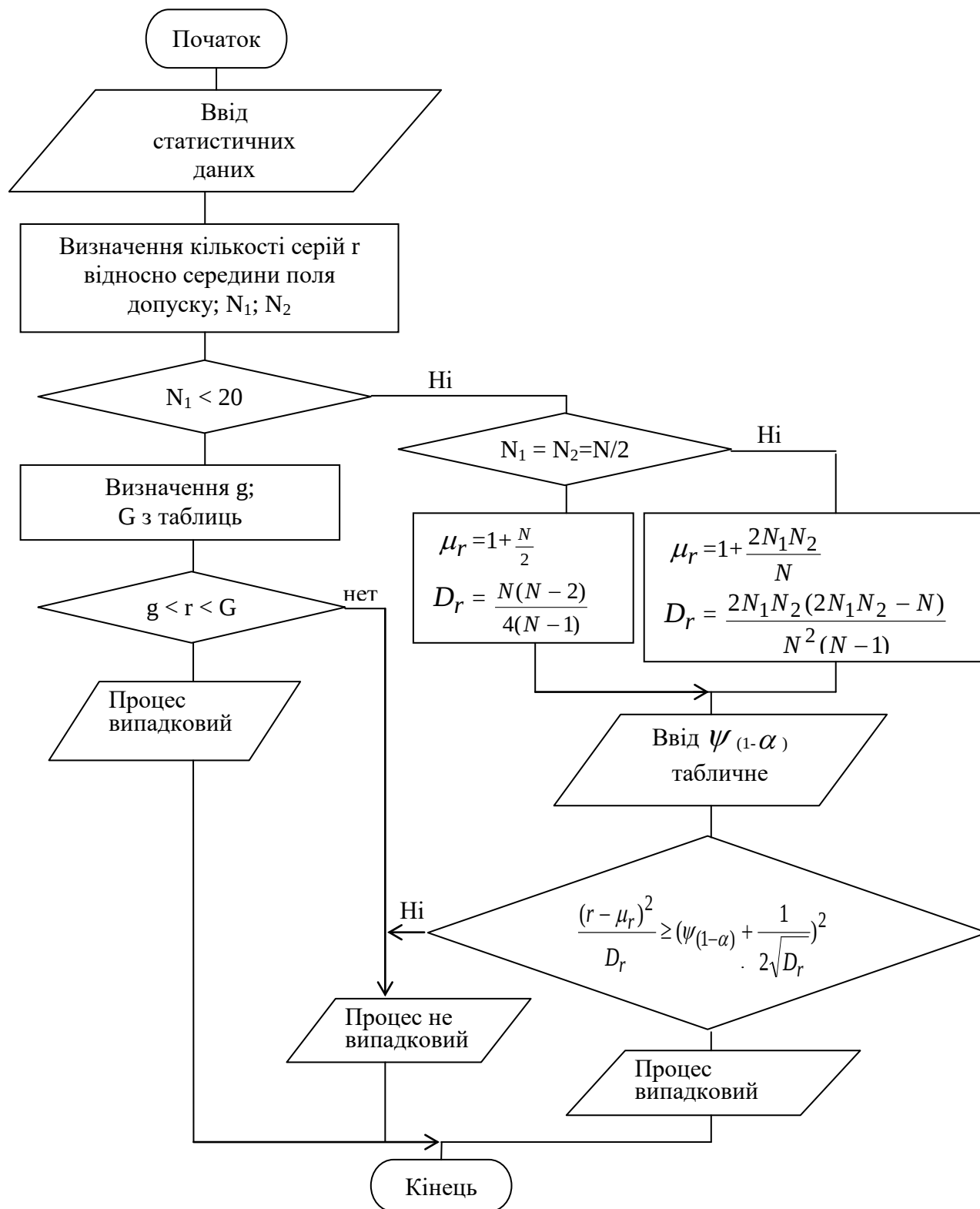


Рис. 3 – Алгоритм визначення сфери дії незалежних випадкових факторів

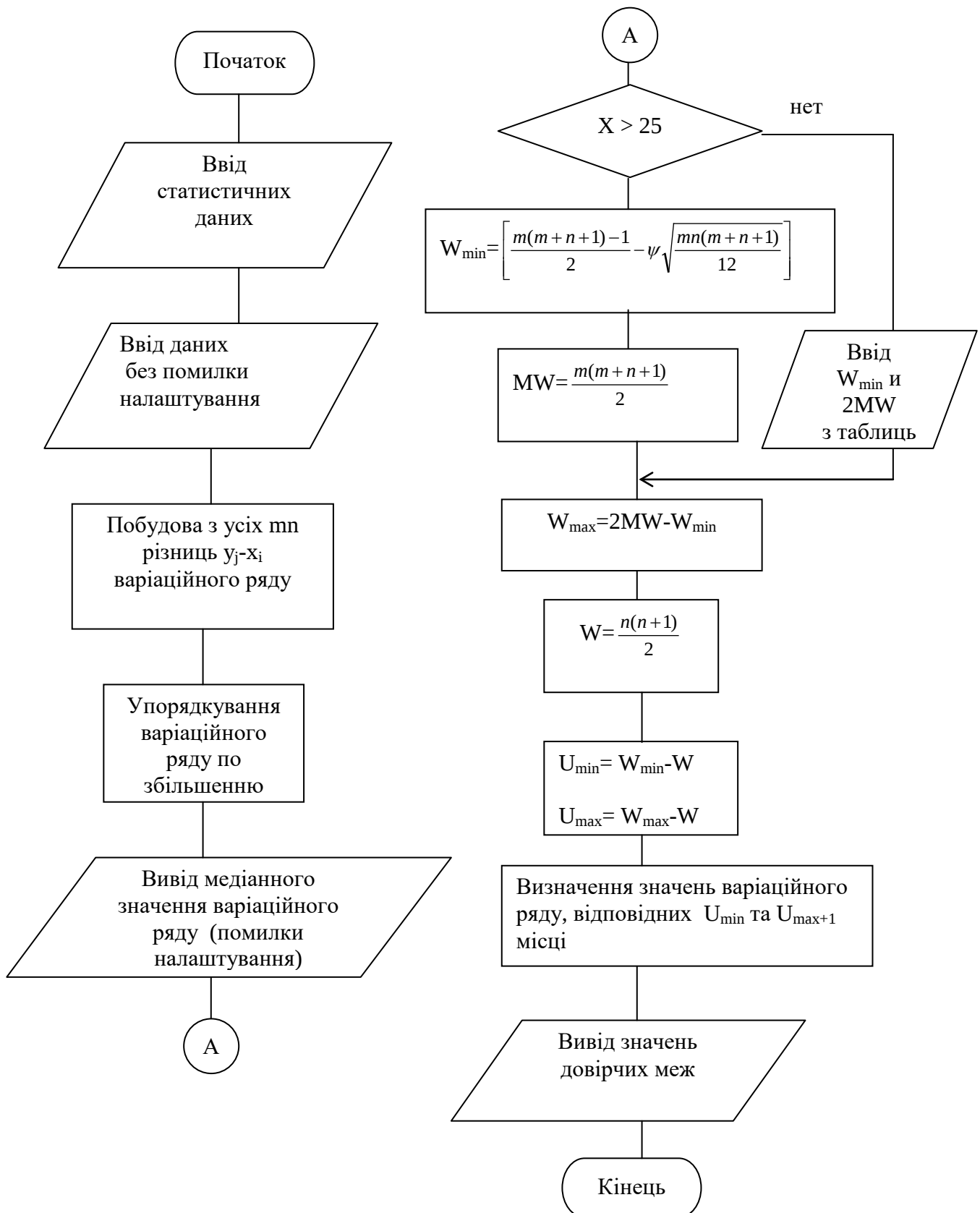


Рис. 4 – Алгоритм визначення помилки налаштування та її довірчих меж

Висновки

Як випливає з викладеного матеріалу, в результаті автоматичного підналагодження за алгоритмом (рис.1) вихідна послідовність розмірів деталей (тобто розмірів деталей, виготовлених з підналагодженням) має постійне середнє значення, мало відрізняється від заданого розміру, і кореляційну функцію незначно відмінну від нуля. Ці характеристики вихідної послідовності – близькість до нуля середнього значення відхилень розмірів, є ознаками, повного вичерпання можливостей подальшого підвищення точності обробки, методами автоматичної налагодження, тобто. шляхом використання інформації про розміри раніше оброблених деталей. Було показано, що алгоритм (рис. 1) повністю компенсує ступінчасті зміни рівня від лінійного тренду.

Складання розвиненого математичного забезпечення, крім безпосереднього результату – автоматичного забезпечення заданої точності на верстатах з ЧПУ, дозволяє суттєво розширити можливості систем автоматичної підготовки керуючих програм шляхом включення до цих систем етапів, пов'язаних з оптимальним програмуванням операцій управління точністю.

Список використаних джерел:

1. Vasiljev E. Modal synthesis of precision control systems / E. Vasiljev, E. Serdechnaya, A. Tavolzhanskij // *E3S Web of Conferences*. – 2020. – № 224 (13). – P. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y. High Dynamic Precision Control System / Y. Vershinin // *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*. – 2018. – № 8. – P. 13–18. doi: 10.24247/ijeerjun20182.
3. Zhang Qingying Computer vision applied in the precision control system / Qingying Zhang // *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*. – 2002. – № 15. – P. 87–89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin F. Automatic debugging of System-on-a-Chip designs / F. Rogin, R. Drechsler, S. Rulke // *SOC Conference, IEEE*. – Belfast, 2009. – № 11089089. – P. 333–336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang S. Change impact analysis for Aspect J programs / S. Zhang, Z. Gu, Y. Lin, J. Zhao // *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Software Maintenance*. – Beijing, 2008. – P. 87–96.
6. Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes / M. Holub [et al.] // *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*. – 2013. – P. 41-48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting / S. Andrei [et al.] // *IEEE Transactions on Computers*. – 2006. – № 55. – P. 830–842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Оцінювання точності координованих отворів малого діаметру, виготовлених з направленням різального інструменту / В. М. Бурдейна [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2021. – № 2 (8). – С. 9–14. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.021.
9. Трищ Р. М. К вопросу автоматического управления точностью обработки / Р. М. Трищ // *Резание и инструмент в технологических системах : междунар. науч.-техн. сб.* – Харьков : ХГПУ. – 1999. – № 54. – С. 227–229.
10. Арпентьев Б. М. Алгоритм системы управления точностью обработки / Б. М. Арпентьев, А. С. Гордеев, Р. М. Трищ // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Машиностроение*. – 1999. – № 54. – С. 7–11.
11. Трищ Р. М. Стабилизация точности обработки / Р. М. Трищ, А. С. Гордеев // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Новые решения в современных технологиях*. – 1999. – № 45. – С. 44–45.
12. Арпентьев Б. М. Повышение запаса точности при механической обработке / Б. М. Арпентьев, А. С. Гордеев, Р. М. Трищ // *Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Новые решения в современных технологиях*. – 2000. – № 78. – С. 55–56.
13. Трищ Р. М. Управление качеством с использованием методов непараметрической статистики / Р. М. Трищ, С. С. Федин // *Механіка та машинобудування*. – 2002. – № 1. – С. 179–183.

References:

1. Vasiljev, E, Serdechnaya, E & Tavolzhanskij, A 2020, 'Modal synthesis of precision control systems', *E3S Web of Conferences*, no. 224 (13), pp. 01006. doi:10.1051/e3sconf/202022401006.
2. Vershinin, Y 2018, 'High Dynamic Precision Control System', *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research*, no. 8, pp. 13-18. doi: 10.24247/ijeerjun20182.

3. Zhang, Qingying 2002, 'Computer vision applied in the precision control system', *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, no. 15, pp. 87-89. doi: 10.3901/CJME.2002.01.087.
4. Rogin, F, Drechsler, R & Rulke, S 2009, 'Automatic debugging of System-on-a-Chip designs', *SOC Conference, IEEE*, Belfast, № 11089089, pp. 333-336. doi:10.1109/SOCCON.2009.5398027.
5. Zhang, S, Gu, Z, Lin, Y & Zhao, J 2008, 'Change impact analysis for Aspect J programs', *Proceedings 24th IEEE International Conference on Software Maintenance*, Beijing, pp. 87-96.
6. Holub, M, Michalicek, M, Vetiska, J & Marek, J 2013, 'Prediction of Machining Accuracy for Vertical Lathes', *Mechatronics 2013: Recent Technological and Scientific Advances*, pp. 41-48. doi: 10.1007/978-3-319-02294-9-6.
7. Andrei, S, Chin, W, Cheng, A & Lupu, M 2006, 'Automatic debugging of real-time systems based on incremental satisfiability counting', *IEEE Transactions on Computers*, no. 55, pp. 830-842. doi:10.1109/TC.2006.97.
8. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR 2021, 'Otsiniuvannia tochnosti koordynovanykh otvoriv maloho diametru, vyhotovlenykh z napravlenniam rizalnoho instrumentu', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu KhPI, Seriya Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiyi politekhnichnyi universytet, Kharkiv, no. 2 (8), pp. 9-14. doi: 10.20998/2413-4295.2021.02.021.
9. Tryshch, RM 1999, 'K voprosu avtomaticheskogo upravleniya tochnosti obrabotky', *Rezanye y instrument v tekhnolohycheskykh systemakh. Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskyyi sbornik*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Kharkivskiyi politekhnichnyi universytet, Kharkiv, no. 54, pp. 227-229.
10. Arpentev, BM, Hordeev, AS & Tryshch, RM 1999, 'Alhorytm systemy upravleniya tochnosti obrabotky', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Mashynostroenye*, no. 54, pp. 7-11.
11. Tryshch, RM & Hordeev, AS 1999, 'Stabylyzatsiya tochnosti obrabotky', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Novye resheniya v sovremennkh tekhnolohiyakh*, no. 45, pp. 44-45.
12. Arpentev, BM, Hordeev, AS & Tryshch, RM 2000, 'Povyshenye zapasa tochnosti pry mekhanicheskoi obrabotke', *Vestnyk Kharkovskoho hosudarstvennoho polytekhnicheskoho unyversyteta: Novye resheniya v sovremennkh tekhnolohiyakh*, no. 78, pp. 55-56.
13. Tryshch, RM & Fedyn, SS 2002, 'Upravlenye kachestvom s yspolzovanyem metodov neparametrycheskoi statystyky', *Mekhanika ta mashynobuduvannia*, no. 1, pp. 179-183.

Стаття надійшла до редакції 18 вересня 2022 року

УНІФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Грінченко Г.С., Артюх С.М., Грінченко В.В., Негодов С.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Грінченко Анна Сергеевна, 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.

Артюх Світлана Миколаївна (Артюх Светлана Николаевна, Artiukh Svitlana): ORCID: 0000-0003-0804-6313; email: artyhsn@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

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

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

В статті розглянуто можливість застосування алгоритмів та методів технічної діагностики та оцінювання залишкового ресурсу трубопроводів, що транспортують енергоносії на основі методів контролю та оцінки технічного стану трубопроводів енергетичного обладнання. Для підтвердження теоретичних припущень проаналізовано технічні характеристики трубопроводу, що має в якості енергоносія водень та зроблено розрахунок напружено-деформованого стану трубопроводу на основі побудованої кінцево-елементної моделі ділянки трубопроводу. Проведено розрахунок напруженого стану для внутрішніх температурних навантажень трубопроводу при температурі 0° та -20°C, що дало змогу виявити та оцінити напруження, що виникають на ділянці. В результаті проведеного дослідження виявлено не значний вплив температур на стан трубопроводу та відхилення щодо розподілу напружень. Спираючись на результати досліджень запропоновано уніфіковану систему методів технічної діагностики на основі системи типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження в залежності від температури та інших технологічних характеристик трубопроводних систем на основі розробленого технологічного коду. Такий підхід дає можливість проводити оцінку технічного стану шляхом вибору відповідного методу розрахунку для трубопроводів різного призначення.

Ключові слова: трубопровід, технічна діагностика, безпечна експлуатація, кодифікація, систематизація, класифікація.

Hrinchenko H., Artiukh S., Hrinchenko V., Nehodov S. “Unification of technical diagnostic methods of pipeline systems with the purpose of ensuring safe operation”

The article considers the possibility of applying algorithms and methods of technical diagnostics and assessment of the residual resource of pipelines that transport energy carriers based on methods of control and assessment of the technical condition of pipelines of energy equipment. To confirm the theoretical assumptions, the technical characteristics of the pipeline, which has hydrogen as an energy carrier, were analyzed, and the stress-strain state of the pipeline was calculated based on the constructed finite element model of the pipeline section. The calculation of

the stress state was carried out for the internal temperature loads of the pipeline at temperatures of 0° and -20°C, which made it possible to identify and evaluate the stresses occurring in the area. As a result of the conducted research, it was found that the temperature does not have a significant effect on the state of the pipeline and deviations in the stress distribution. Based on the research results, a unified system of technical diagnostics methods is proposed based on the typification system for calculating the residual resource of pipelines under different types of load depending on temperature and other technological characteristics of pipeline systems based on the developed technological code. This approach makes it possible to assess the technical condition by choosing an appropriate calculation method for pipelines of various purposes.

Keywords: pipeline, technical diagnostics, safe operation, codification, systematization, classification.

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

Для забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем різного призначення необхідно мати систему нормативної документації, яка відображатиме вимоги для визначення ресурсу трубопроводів, пов'язані з параметрами їх навантаження. Таку систему можна створити на основі типізації та уніфікації трубопроводів і відповідного розрахунку їх залишкового ресурсу. Інструментом типізації у широкому розумінні є класифікація об'єктів чи процесів за ознаками, необхідні рішення поставленої завдання, в даному випадку, таким принципом класифікації можна обрати методи контролю.

До завдань досліджень входить створення нормативного забезпечення безпечної експлуатації на основі розробки науково-обґрунтованої моделі та алгоритму розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів різного призначення. Математична модель дасть змогу визначити здатність виробу (в даній роботі, трубопроводів) виконувати задані функції протягом проектного терміну експлуатації та прогнозувати ресурс, тобто можливість продовжити проектні терміни безпечної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завданням оцінка технічного стану та продовження терміну служби енергообладнання та різних носіїв енергоносіїв присвячено багато науково-технічних робіт. Оцінка технічного стану обладнання енергоблоків вимагає комплексного підходу. Така комплексна оцінка пропонується авторами визначення якості експлуатації трубопровідних систем з урахуванням особливостей їх напружено-деформованого стану та сейсмічної стійкості [1-4]. Методи дослідження: розрахунки з використанням математичної моделі; порівняння результатів розрахунку, прогнозування граничних параметрів технічного стану та моніторинг механічних властивостей матеріалу магістрального трубопроводу; огляд, кваліфікація, визначення залишкового ресурсу будівель, споруд, фундаментів та металевих конструкцій з урахуванням геотехнічних та сейсмотектонічних умов. Цей алгоритм дослідження можна взяти за основу для оцінки технічного стану, а саме його загальну модель.

Для забезпечення безпеки понад проектний термін та якості роботи енергообладнання необхідно створити ефективний механізм вивчення технічного стану, який би максимально оптимізував його роботу, виходячи із сприятливого співвідношення економічних показників та безпеки. Такі підходи розкрито авторами у наукових дослідженнях [5-8].

Разом з тим є ряд невирішених питань, щодо можливості проведення технічної діагностики та забезпечення безпеки експлуатації трубопроводів іншого призначення, що мають відмінні від запропонованих енергоносіїв, адже в роботах [1-8], розглядаються енергообладнання та трубопровідні системи атомного комплексу.

Метою роботи є уніфікація методів контролю трубопровідних систем різного призначення на основі запропонованої моделі технічної діагностики з метою забезпечення безпеки їх експлуатації.

Виклад основного матеріалу

В якості трубопровідних систем розглянемо ділянку трубопроводу, що транспортує водень та водневі суміші. Даний тип енергоносія має ряд особливостей, відмінності від транспортування теплоносія, але за модель технічної діагностики та методів контролю пропонується взяти існуючі методи дослідження для трубопровідних систем з теплоносієм (пара, вода).

Водень і водневі суміші розглядаються як перспективне паливо. Для широкомасштабного застосування водню необхідно вирішити проблеми з його транспортуванням.

Водень до місця його використання можна транспортувати в газоподібному і рідкому станах, а також за допомогою рідких та твердих носіїв, які містять водень у зв'язаному вигляді. Носіями можуть бути гідриди металів, наноструктури, рідкі вуглеводні та інші багаті воднем з'єднання. В даний час водень транспортується у скрапленому вигляді в криогенних автомобільних та залізничних цистернах та у газоподібному стані шляхом трубопровідних систем або трейлерами, що оснащені спеціальними трубами-контейнерами під тиском. Використання транспортних засобів застосовують, як правило, коли немає доступу до трубопроводу. Транспортування газоподібного водню за допомогою трубопровідних систем може відбуватись двома шляхами:

- По спеціальним водневим трубопроводам;
- По існуючим трубопроводам природного газу.

В будь-якому варіанті для тривалого зберігання, а також для транспортування рідкого водню з мінімальними втратами від випаровування бажано підтримувати його в переохолодженому стані.

На рис. 1. представлений фрагмент труби з зовнішнім діаметром $d = 0,12$ м, товщиною стінки $0,02$ м і довжиною 1 метр, яка жорстко закріплена по торцях. механічні та температурні характеристики якої наведені в таблиці 1 і на рис. 2.

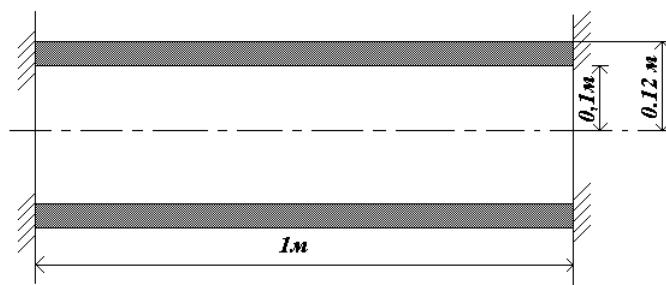


Рис. 1 – Ділянка труби, для якої проводиться рішення задачі термопружності

Таблиця 1 – Властивості трубопроводу в залежності від температури

Температура випробування, °С	20	10	0	-5	-10	-20
Температура випробування, °К	293	283	273	268	263	253
Модуль нормальної пружності, Е, МПа	200	208	203	197	189	177
Модуль пружності при здвигу G, МПа	78	77	76	73	69	66
Щільність, ρ , г/м ³	0,913	0,914	0,914	0,915	0,916	0,917
Коефіцієнт теплопровідності, λ	0,25	0,26	0,26	0,28	0,30	0,30
Коефіцієнт лінійного розширення, α (10^{-6} (°С))	59,4	59,41	59,42	59,43	59,44	59,45
Питома теплоємність, С, Дж/(кг С)	1680	1600	1500	1450	1350	1200

Класифікація трубопроводів і відповідно методів здійснимо відповідно до [4] та закодифікуємо їх відповідно до температурного випробування:

ТВ20 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 20°C;

ТВ10 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 10°C;

ТВ00 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань 0°C;

ТВ-5 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -5°C;

ТВ-10 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -10°C;

ТВ-20 – трубопровід з водневим енергоносієм з температурою випробувань -20°C;

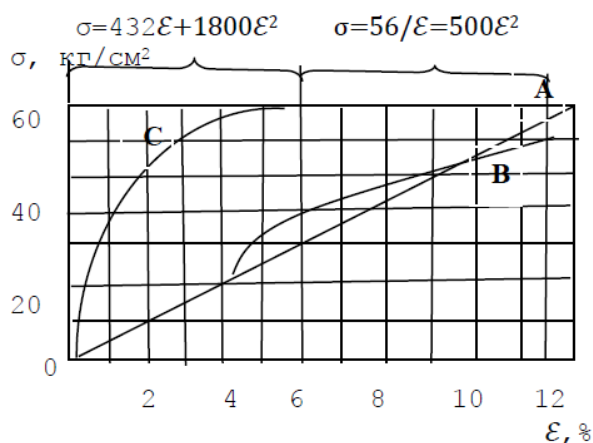


Рис. 2 – Діаграма статичного опору поліетиленових труб (при σ – напруга, кг/см^2 , ε – подовження, %): А – спрощене рівняння: $\sigma=5\varepsilon$; В – крива опору; С – діаграма розтягнення при певній швидкості деформації

Для вирішення термоміцнісної задачі спершу вирішується завдання розподілу температур по об'єму труби, потім отримане температурне поле прикладається в якості граничних умов в задачі міцності. Розглянемо рішення температурної задачі методом кінцевих елементів (КЕ).

На рисунку 3 представлена КЕ модель розглянутого фрагмента труби.

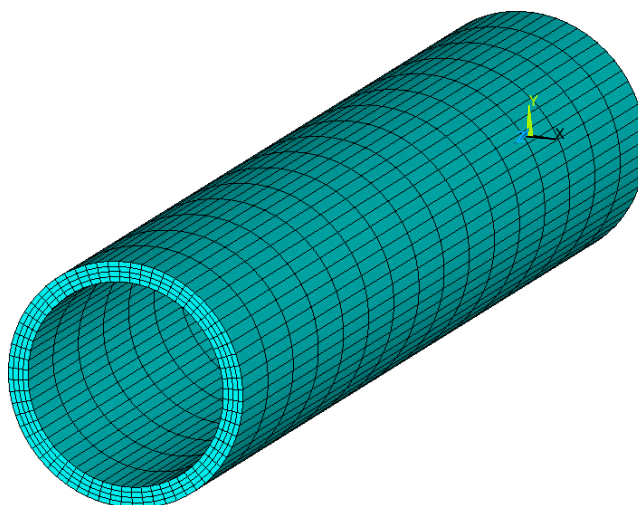


Рис. 3 – Кінцево-елементна модель трубопроводу

Граничні умови, що накладаються на модель, показані на рис. 4. На внутрішній поверхні задається температура -20°C , на зовнішній поверхні - кімнатна температура 30°C і коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 5,678 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

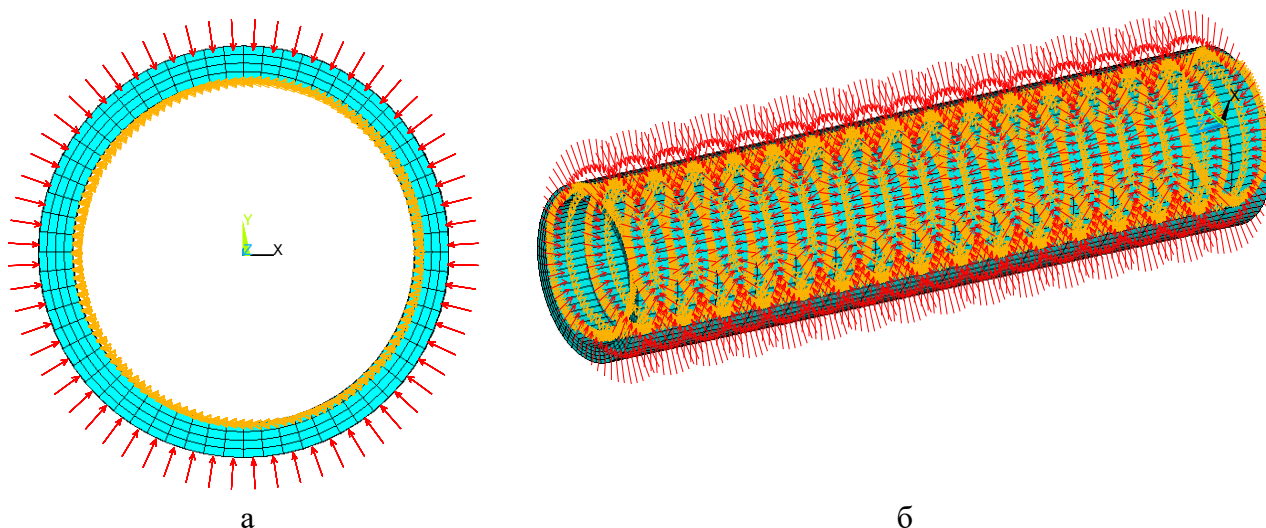


Рис. 4 – Граничні умови: а) - вид з торця; б) - аксонометрія

В результаті КЕ розрахунку отримуємо розподіл напружено деформованого стану ділянки трубопроводу в залежності від внутрішньої температури. Як видно з рисунка, температури всередині і зовні труби мало відрізняються і рівні температурі протікає по трубі теплоносія.

Результати рішення завдання забезпечення міцності з урахуванням температури представлені на рис. 6 при температурі 0°C і на рис. 7 при температурі -20°C .

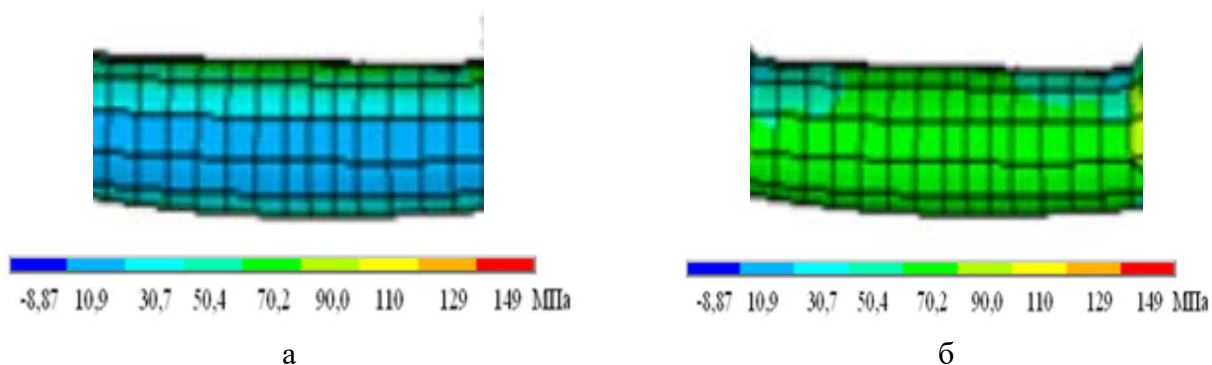


Рис. 5 – Напружено деформований стан при температурі: а) 0°C ; б) -20°C

Як видно з малюнків, при розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) конструкції, температура не погіршує стан труби, але дає додаткові навантаження, що пропонується врахувати при оцінюванні технічного стану та безпечності подальшої експлуатації.

На основі математичної моделі уніфіковано методи розрахунку та розроблено типізовану систему визначення залишкового ресурсу трубопроводів за різних типів навантаження та температурного режиму (табл. 2), згідно з кодифікатором [4] та

запропонованим кодифікатором трубопроводів з водневим енергоносієм при різних температурах, що дозволяє підвищити достовірність прогнозу.

Таблиця 2 – Система типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження

Код трубопро- воду	Моделі визначення ресурсу при технічній діагностиці трубопроводів різного призначення та різного навантаження	Примітка
K2B01 K2П01 K2Д01 K3B01 K3П01 K3Д01 K4П01 ТВ20 ТВ10	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)4}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	ε_a – малоциклова втома; σ_{-1} – межа втоми; E – модуль пружності; φ – коефіцієнт поперечного січення
K1B02 K2B02 K2Д02 K3B02 K3Д02 K4П02 ТВ00	$N = \left[\frac{(\varepsilon_{ai} - \sigma_{-1}/E)4}{\ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)} \right]^m$	ε_{ai} – малоциклова втома при блочному навантаженні
K2B03 K2Д03 K3B03 K3Д03	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta \sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^{\frac{n-2}{2}}} - \frac{1}{a_c^{\frac{n-2}{2}}} \right]$	n – число циклів до руйнування; C – константа, що характеризує циклічне руйнування
K2B13 K2Д13 K3B13 K3Д13	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)4}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	m – коефіцієнт, що характеризує механічні руйнування
K2B23 K2Д23 K3Д23 ТВ-5 ТВ-10 ТВ-20	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta \sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_0^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(n-2)/2}} \right]$	Y – коефіцієнт інтенсивності напруження при низькотемпературних руйнуваннях

Наприклад, при визначенні залишкового ресурсу та технічної діагностики трубопроводу, особливо важливого в системі безпеки при проведенні розрахунку, необхідно вирішувати комплексне завдання впливу всіх типів навантаження, та враховувати температурне навантаження (ТВ-10,ТВ-20), що буде враховано за допомогою відповідного модуля пружності та величина малоциклових навантажень. А наприклад, у технологічному коді для дренажної трубопровідної системи від ПНД (підігрівач низького тиску) до ПВД (підігрівач високого тиску) тип навантаження та середовище теплоносія будуть позначатися символами - A13, що говорить, що при оцінці віброміцності трубопровідної системи величини малоциклового навантаження не враховується, а вихідними параметрами є лише амплітуда та частота вібрації, швидкість та величина зносу стінок трубопроводів. Запропонована система стане основою для удосконалення нормативного забезпечення з технічної діагностики трубопровідних систем різного призначення для оцінки та забезпечення експлуатаційної безпеки.

Висновки

- 1) Проаналізовано вплив температурного навантаження енергоносія на напружено-деформований стан трубопровідної системи та виявлено не значний вплив низьких температур у порівнянні з нормальними умовами експлуатації, але такий вплив викликає малоциклові навантаження, що необхідно враховувати при технічній діагностиці трубопроводів різного призначення.
- 2) Запропоновано систематизацію трубопровідних систем з урахуванням температури енергоносія та критеріями навантаження трубопровідних систем та елементів конструкцій та відповідний технологічний кодифікатор для трубопроводів з енергоносієм різної температури;
- 3) На основі систематизації запропоновано систему типізації розрахунку залишкового ресурсу трубопроводів при різних типах навантаження, що дає змогу враховувати температурні навантаження та вплив їх на напружено-деформований стан.

Список використаних джерел:

1. Кіпоренко Г. С. Оцінка технічного стану трубопровідних систем АЕС на відповідність нормативним параметрам / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович, О. М. Хорошилов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 4. – С. 146–152.
2. Кіпоренко Г. С. Вдосконалення методики розрахунку опору крихкому руйнуванню трубопроводів Південно-Української АЕС / Г. С. Кіпоренко, М. Є. Пахалович // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 7. – С. 181–184.
3. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant / H. Hrinchenko, R. Trisch, V. Burdeina, S. Chelysheva // Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. <https://doi.org/10.46813/2019-120-104>.
4. Кіпоренко Г. С. Удосконалення нормативного забезпечення експлуатаційної безпеки трубопровідних систем атомних електростанцій : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Г. С. Кіпоренко ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2010. – 20 с.
5. Cancemi S. Inverse Heat Conduction Problem in Estimating NPP Pipeline Performance / S. Cancemi, R. Frano // Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science. – Vol. 8, iss. 3. – P. 034501. <https://doi.org/10.1115/1.4053689>.
6. Inverse Space Marching Method for Determining Temperature and Stress Distributions in Pressure Components / J. Taler [et al.] // Developments in Heat Transfer. – Rijeka, Croatia, 2011. – P. 273–292. <https://doi.org/10.5772/21614>.
7. Cancemi S. Preliminary Analysis of Long-Term Performance of a Piping: Aging and Creep Effect / S. Cancemi, R. Frano // Materials. – 2021. – Vol. 14, iss. 7. – P. 1703. <https://doi.org/10.3390/ma14071703>.
8. Chekurin V. Amathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipelines in transient operational modes / V. Chekurin, Yu. Ponomaryov, O. Khymko // An international quarterly journal. – 2015. – Vol. 4, no. 3. – P. 25–32.

References:

1. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, 'Otsinka tekhnichnoho stanu truboprovodnykh system AES na vidpovidnist normatyvnykh parametrov', *Systemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.
2. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, 'Vdoskonalennia metodyky rozrakhunku oporu krykhkomu ruinuuvanniu truboprovodiv Pivdenno-Ukrainskoi AES', *Systemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.
3. Hrinchenko, H, Trisch, R, Burdeina, V & Chelysheva, S 2019, 'Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant', *Problems of Atomic Science and Technology, Section Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, no. 2 (120), pp. 104-110.
4. Kiporenko, HS 2010, 'Udoskonalennia normatyvnoho zabezpechennia ekspluatatsiinoi bezpeky truboprovodnykh system atomnykh elektrostansii', *Kand.tekh.n. abstract, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia*, Kharkiv.
5. Cancemi, S & Frano, R 2022, 'Inverse Heat Conduction Problem in Estimating NPP Pipeline Performance', *Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science*, vol. 8, iss. 3, pp. 034501.
6. Taler, J, Weglowski, B, Sobota, T, Jaremkiewicz, M & Taler, D 2011, 'Inverse Space Marching Method for Determining Temperature and Stress Distributions in Pressure Components', *Developments in Heat Transfer*, Rijeka, Croatia, pp. 273-292.
7. Cancemi, S & Frano, R 2021, 'Preliminary Analysis of Long-Term Performance of a Piping: Aging and Creep Effects', *Materials*, vol. 14, iss. 7, pp. 1703.
8. Chekurin, V, Ponomaryov, Yu & Khymko, O 2015, 'A mathematical model for evaluation the efficiency of gas-main pipelines in transient operational modes', *An international quarterly journal*, vol. 4, no. 3, pp. 25-32.

Стаття надійшла до редакції 17 вересня 2022 року

ПІДХОДИ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ОБ'ЄКТІВ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

© Грінченко Г.С., Тріщ Ю.В., Грінченко В.В., Багаєв І.О., Фатєєва Л.Ю.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

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

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

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

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

Фатєєва Ліна Юрійвна (Фатеева Лина Юрьевна, Fatieieva Lina): ORCID: 0000-0002-6460-0772; e-mail: linafat81@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті розглянуто підходи до оцінювання ризиків функціонування систем. Проаналізовано та виокремлено основні проблеми при кваліметричному оцінюванні ризиків, а саме необхідності комплексного підходу до оцінювання ризиків та важливості оцінювання не тільки функціонування окремих компонентів системи, а взаємозв'язку між ними, процесів, що функціонують у системі. Запропоновано для кваліметричного оцінювання вважати ризиком обернену величину надійності. На основі аналізу запропоновано оцінювання ризиків розділити на дві моделі функціонування системи. Перша модель представлено таким параметром надійності, як безвідмовність та характеризує розвиток системи до настання критичного моменту, події, колапсу, а друга модель представлено таким параметром надійності, як ремонтпригодність, що характеризує етап функціонування системи після настання критичної події та характеризує відновлення функціонування системи, адаптацію до несприятливих умов. Запропоновано в якості оцінювання ризиків функціонування систем фізико-статистичну математичну модель на основі інтенсивності відмов та ймовірності відновлення роботи системи. Такий підхід дає можливість оцінювати ефективність впровадження, організації та функціонування системи, а найголовніше управляти та удосконалювати функціонування системи на будь-якому етапі життєвого циклу.

Ключові слова: ризик, системи, кваліметричне оцінювання, надійність, безвідмовність, відновлюваність

Hrinchenko H., Trishch Yu., Hrinchenko V., Bahaiev I. “Approaches to risk assessment of the functioning of systems of facilities for different purposes”.

The article considers approaches to assessing the risks of systems operation. The main problems in qualimetric risk assessment are analyzed and highlighted, namely the need for an

integrated approach to risk assessment and the importance of assessing not only the functioning of individual components of the system, but the relationship between them, and the processes operating in the system. It is proposed to consider the inverse value of reliability as a risk for qualimetric evaluation. Based on the analysis, it is proposed to divide the risk assessment into two models of system operation. The first model is represented by such a reliability parameter as infallibility, and characterizes the development of the system before a critical moment, an event or a collapse, and the second model is represented by such a reliability parameter as maintainability, which characterizes the stage of the system functioning after the occurrence of a critical event, and characterizes the restoration of the system functioning and its adaptation to adverse conditions. A physical-statistical mathematical model based on the intensity of failures and the probability of system recovery is proposed as a risk assessment of the functioning of systems. This approach makes it possible to assess the effectiveness of the implementation, organization and functioning of the system, and most importantly to manage and improve the functioning of the system at any stage of the life cycle.

Keywords: risk, systems, qualimetric assessment, reliability, infallibility, maintainability.

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

В сучасному світі оцінювання ризику будь-якого проекту, системи чи об'єкту є першочергова задача, як на етапі планування, так і на етапі реалізації. Це відноситься для будь-якої системи, будь вона замкнута, відкрита, чи частково-замкнута; макро- чи мікросистема; технічна, екологічна, економічна чи інше. В задачу оцінювання ризику входить як виявлення потенційних ризиків, так і управління ними, що можливо тільки у разі їх кваліметричної оцінки. Разом з тим, складовою оцінювання ризиків є не тільки оцінка ймовірності настання тої чи іншої несприятливої події, але і оцінювання можливості адаптації та відновлення системи з мінімальними втратами в найкоротші терміни. Отже, постає питання щодо застосування та розвитку сучасних підходів до комплексного оцінювання ризиків функціонування систем для об'єктів різного призначення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Концептуальні аспекти управління ризиками висвітлено у багатьох напрацюваннях вчених, як в Україні, так і за кордоном. Так, наприклад, у публікації [1] обґрунтовано, що принципи ризик-менеджменту визначені у різних сферах з використанням різних підходів, які мало корелюються між собою. Тому виникає необхідність адаптації напрацювань світової наукової думки щодо управління ризиками не лише в наукових доробках, а саме в конкретному прикладному їх характері. Як зазначає у своїй публікації О. Білявська, відповідно до нових пріоритетів, зумовлених змінами в суспільстві, відбувається постійна зміна управлінських структур, а відтак стають неефективними традиційні моделі державного управління [2].

Як зазначено вченими Ofer Zwikael та Mark Ahn, глобальне бізнес-середовище передбачає високий рівень ризик і складність, що є необхідною умовою для майбутнього росту та розвитку. Зокрема, менеджерам доводиться справлятися з декількома типами ризиків, включаючи технологічні, фінансові, пов'язані зі страхуванням, екологічною безпекою та регуляторними. Як наслідок, управління ризиками є критично важливим питанням у багатьох бізнес-сферах, які впливає на прибутковість, ефективність і сталість [3].

У публікації [4] зазначається, що управління ризиками підприємства (ERM) є надзвичайно важливою сферою через її економічні наслідки. Все більше і більше компаній

звертають на це увагу, враховуючи значну економію за рахунок уваги до різних аспектів ризику. У той же час ERM став свідком зміни способу, яким фірми керують багатьма факторами невизначеності, які стоять на шляху досягнення їхніх стратегічних, операційних і фінансових цілей. Тим не менш, існуючі системи управління ризиками (RMIS) не є ані потужними, ані достатньо гнучкими, щоб моделювати складність процесу управління ризиками. Авторами пропонується програмне забезпечення, моделювання управління ризиками ARMISTICE (Advanced Risk Management Information System: Tracking Insurances, Claims and Exposures).

Традиційно оцінку ризику для якості та управління ним здійснювали за допомогою різних способів, які базувалися, наприклад, на комбінації спостережень, тенденцій та іншої інформації. Можна виділити найбільш розповсюджені методи оцінювання ризиків [5-9]:

1. Основні допоміжні методи управління ризиками (блок-схеми, контрольні карти тощо);
2. Аналіз характеру наслідків відмов (Failure Mode Effects Analysis – FMEA);
3. Аналіз характеру, наслідків та критичності відмов (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis – FMECA);
4. Аналіз дерева помилок (Fault Tree Analysis – FTA);
5. Аналіз експлуатаційної безпеки та критичні контрольні точки (Hazard Analysis and Critical Control Points – HACCP);
6. Аналіз експлуатаційної безпеки та працездатності (Hazard Operability Analysis – HAZOP);
7. Попередній аналіз експлуатаційної безпеки (Preliminary Hazard Analysis – PHA);
8. Ранжирування та фільтрація ризиків;
9. Відповідні статистичні методи.

Метою роботи є аналіз існуючих методів оцінювання ризиків функціонування систем для їх подальшого удосконалення та розвитку.

Виклад основного матеріалу

В даний час існує багато методів розрахунку ризику. Ці методи зручно розділити на дві групи [5]:

- якісні методи дозволяють отримувати усереднені узагальнені відомості про ризик заподіяння шкоди для груп продукції або значення ризику для конкретного виду продукції;
- кількісні методи: статистичні, що дозволяють отримувати усереднені по однорідній групі продукції або популяції відомості про ризик (безпеки) заподіяння шкоди;
- розрахункові (індивідуальні), що дозволяють отримувати значення ризику для конкретного виду продукції.

Аналіз характеру наслідків відмов (FMEA) – це системний метод аналізу, спрямований на запобігання невідповідностей (помилкам, відхилень, дефектів) призначений для оцінювання характеру потенційних відмов для процесу, а також їх можливих наслідків на результат процесу та/або характеристики продукції [5]. Метод застосовується для певного процесу, можливо застосовувати для оцінювання функціонування всієї системи, але є певні недоліки в узагальненні даних.

Аналіз характеру, наслідків та критичності відмов (FMECA) [5] може бути розширений, щоб включити дослідження ступеня тяжкості наслідків, відносної ймовірності інцидентів, а також їх здатності до виявлення; таким чином, FMEA стає аналізом характеру, наслідків та критичності відмов (FMECA). Для проведення такого аналізу мають бути встановлені специфікації на продукцію та процес. За допомогою FMECA можуть бути встановлені точки,

де необхідні додаткові запобіжні заходи, щоб звести ризики до мінімуму. Цей підхід дає більш повну картину у порівнянні з аналізом характеру наслідків відмов (FMEA).

Аналіз дерева помилок (FTA) – це підхід, що припускає невідповідність функціональних характеристик продукції або процесу [5]. За допомогою цього інструменту оцінюють одноразові помилки системи (або частини системи), але можуть бути поєднані численні чинники відмови шляхом встановлення причинних ланцюжків.

Аналіз експлуатаційної безпеки та критичні контрольні точки (НАССР) є системним, превентивним та запобіжним інструментом для забезпечення якості, надійності та безпеки продукції. Це структурований підхід із застосуванням технічних та наукових принципів для аналізування, оцінювання, попередження та контролю ризику або несприятливих наслідків небезпеки, які є результатом планування, розробки, виробництва та застосування препаратів [6].

НАССР складається з семи наступних етапів [6]:

1. проведення аналізу безпеки та визначення запобіжних заходів для кожної стадії процесу; 2. визначення критичних контрольних точок; 3. встановлення критичних меж; 4. введення системи перевірки критичних контрольних точок; 5. визначення коригувальних заходів, які мають бути прийняті, якщо при моніторингу встановлено, що критичні контрольні точки є неконтрольованими; 6. введення системи підтвердження, що система НАССР працює ефективно; 7. введення системи зберігання протоколів. НАССР можна застосовувати, щоб визначити ризики, пов'язані із фізичною, хімічною та біологічною небезпекою (у тому числі мікробною контамінацією), та управляти ними. НАССР найбільш корисний, коли розуміння продукції та процесу є достатньо повним для того, щоб забезпечити ідентифікацію критичних контрольних точок.

Аналіз експлуатаційної безпеки та працездатності (HAZOP) заснований на теорії, яка припускає, що випадки ризику є наслідком відхилення від запланованих або робочих параметрів [10]. Це є системна техніка «мозкового штурму» для ідентифікації небезпеки з використанням так званих «спрямовуючих слів». «Спрямовуючі слова» (наприклад, «ні», «більше», «інший ніж», «частина ...» тощо) застосовують до відповідних параметрів (наприклад, контамінація, температура), щоб допомогти встановити можливі відхилення від звичайних або запланованих параметрів.

Попередній аналіз експлуатаційної безпеки (РНА) є інструментом аналізу, заснованого на використанні попереднього досвіду або знань щодо небезпеки або відмови, з метою виявлення інших факторів небезпеки в майбутньому, небезпечних ситуацій та випадків, що можуть бути причиною шкоди, а також з метою оцінювання їх ймовірності стосовно даної діяльності, даних технічних засобів, продукції або системи [10]. Інструмент полягає у:

1. ідентифікації можливостей того, що станеться випадок, пов'язаний з ризиком;
2. якісній оцінці ступеня можливого ушкодження або шкоди для здоров'я, що є наслідком;
3. відносному ранжируванню небезпеки з використанням комбінації тяжкості та ймовірності випадку;
4. визначенні можливих коригувальних дій. РНА може бути корисним при аналізі існуючих систем або при визначенні небезпеки, якщо обставини не дозволяють застосовувати більш масштабний спосіб.

Ранжирування та фільтрація ризиків є інструментом для порівняння та ранжирування ризиків. Ранжирування ризиків складних систем, як правило, вимагає оцінки численних різноманітних кількісних та якісних факторів щодо кожного ризику. Інструмент полягає у поділі основної проблеми, пов'язаної з ризиком, на багато компонентів, що необхідно для

фіксування факторів, пов'язаних з ризиком. Ці фактори поєднують в одну відносну шкалу ризиків, яку можна застосовувати для ранжирування ризиків.

Допоміжні статистичні методи можуть допомагати управлінню ризиками для якості та полегшувати його [8-10]. Вони забезпечують можливість ефективної оцінки даних, допомагають при визначенні важливості набору(ів) даних, а також сприяють прийняттю більш правильних рішень. Перелік деяких основних статистичних методів включає [8-10]: контрольні карти (карти приймального контролю, контрольні карти для арифметичного середнього з попереджувальними межами, контрольні карти кумулятивних сум, контрольні карти Шухарта, зважене рухоме середнє значення); план експериментів (Design of Experiments – DOE); гістограми; діаграми Парето; причинно-наслідкова діаграма; аналіз придатності процесу.

Розглянемо різні визначення ризику, що даються вітчизняними та зарубіжними авторами[11-13]:

1. Ризик – потенційна, чисельно вимірна можливість втрати. Поняттям ризику характеризується невизначеність, пов'язана з можливістю виникнення в ході реалізації проекту несприятливих ситуацій і наслідків.

2. Ризик – ймовірність виникнення втрат, збитків, недонадходжень планованих доходів, прибутку.

3. Ризик – це невизначеність наших фінансових результатів у майбутньому.

4. J. P. Morgan визначає ризик як ступінь невизначеності отримання майбутніх чистих доходів.

5. Ризик – це вартісне вираження імовірнісного події, що призводить до втрат.

6. Ризик – шанс несприятливого результату, небезпека, загроза втрат і пошкоджень.

7. Ризик – ймовірність втрати цінностей (фінансових, матеріальних товарних ресурсів) в результаті діяльності, якщо обстановка і умови проведення діяльності будуть змінюватися в напрямку, відмінному від ризику, передбаченого планами і розрахунками.

Разом з тим необхідно і розуміти що мається на увазі і під системою, і в якому розрізі розглядаються системи. Для оцінювання ризиків функціонування технічних систем різного призначення ми розглядаємо комплексну адаптивну систему.

Комплексна адаптивна система (Complex Adaptive System) – це динамічна мережа або система, що складається з багатьох агентів. Під агентами розуміють, організації, фірми, види, залежно від рівня, людські ресурси, технічні компоненти, будь-що інше, які діють автономно та постійно реагують один на одного, тобто є тісний взаємозв'язок між агентами системи. Системи є екзогенні (відкриті) та ендогенні (закриті), але в будь якому випадку системи динамічні, постійно розвиваються, змінюються. Оцінювання такої системи завжди має нові вихідні дані, є передумови її роботи, які будуть завжди різними, історія системи незворотна. І в нашому випадку, нас цікавить надійність усієї системи, тобто не окремих агентів (складових) системи, а і їх взаємозв'язок, що припускається як обернена величина ризику. Навіть більше, при оцінюванні таких систем, взаємозв'язок агентів (компонентів) системи має більше значення для аналізу та управлінню ризиками, ніж окремі компоненти. Адже для оцінювання та управління ризиками головне не стійкість окремих компонентів, що можливо оцінити по характеристикам надійності технічних конструкцій, об'єктів тощо, та вони відомі заздалегідь, закладені проєктними організаціями з певним запасом, та визначаються існуючими методиками та стандартами. Для управління та оцінювання ризиків більш вагомим є саме зв'язок окремих агентів та можливість адаптуватись, відновлюватись та управляти ризиками функціонування систем.

Сучасні підходи до розуміння поняття управління ризиками базується на так званій «концепції прийнятного ризику», згідно з якою основною метою є отримання максимальної надійності всіх видів діяльності шляхом підтримання сукупного ризику в межах заданих

стратегією розвитку соціально-економічної системи [15]. Але розвиток системи нелінійний, тому прогнозувати як система себе поведе у той чи інший час на сто відсотків неможливо, ми можемо лише запропонувати вірогідність настання тої, чи іншої події. Також розвиток системи має злом, так би мовити колапс (Точка А, рис. 1.) після якої йде спад, що також необхідно врахувати при оцінюванні ризику, та поведінку системи після досягнення колапсу, тобто можливість системи до адаптації у період після колапсу (гнучкість, відновлення процесів).

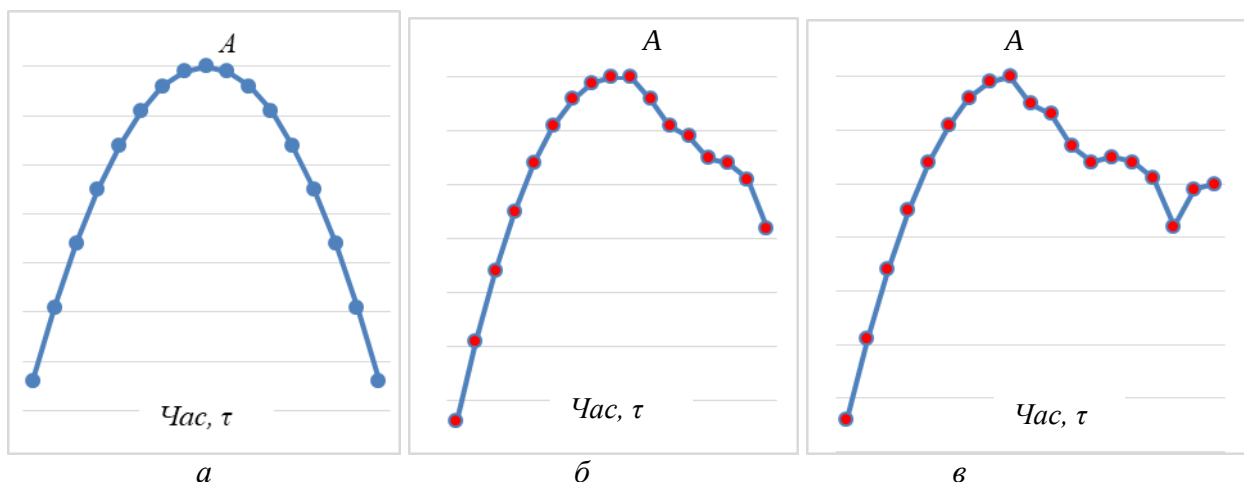


Рис. 1 – Варіанти функціонування системи: *а* – невідновлювана система; *б* – система частково-відновлювальна; *в* – відновлювальна система

Ризик – це результат впливу закономірних та випадкових факторів на якість продукції, процесу чи послуги, який може мати як позитивний, так і негативний ефект.

Пропонується вважати, що ризик – це поняття, яке має кількісне вираження і обернене величині надійності. Тобто, щоб визначити величину ризику, необхідно знати величину надійності. Виходячи з цього, для визначення величини ризику стосовно продукції, процесів чи систем можна застосовувати ті самі методи, що застосовуються при визначенні надійності, тобто застосовувати методи структурного аналізу та методи математичної статистики. Для цього при оцінюванні ризику пропонується розглядати життєвий цикл системи за наступними показниками надійності: безвідмовність (до настання граничного, критичного стану, колапсу А) та ремонтпридатність (тобто відновлюваність системи після критичної події, колапсу А), що у обох випадках описується ймовірнісними характеристиками.

Так як ризик – це позитивна величина, що має кількісне вираження (від нуля до одиниці) і на його показник впливає велика кількість факторів (особливості процесів системи), а час функціонування процесу (τ) – позитивна величина, то, виходячи з такої фізичної суті припускається, що фізико-статистична модель – двопараметрична модель Вейбулла–Гнеденко, яка має вигляд [16]:

$$P(\tau_{\max} < \tau_A < \tau) = F(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\alpha}}, \quad (1)$$

де P – ймовірність безвідмовної роботи, якщо розглядається ділянка кривої функціонування системи до настання граничного, критичного стану, колапсу А; β – масштабний параметр; α – параметр форми⁴

$$P(\tau_{\max} < \tau < \tau_A) = F(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\alpha}}, \quad (2)$$

де P – ймовірність відновлення роботи, якщо розглядається ділянка кривої функціонування системи після настання граничного, критичного стану, колапсу A .

Для вирішення практичних задач з оцінювання ризиків необхідно оцінити параметри моделі (1) та (2) - β та α . І чим ефективнішими будуть оцінки параметрів моделі, тим достовірнішим буде результат і тим меншим необхідний обсяг статистичної інформації [15]. Тому наступним завданням дослідження є знаходження ефективних статистичних оцінок параметрів моделі розподілу (1).

Рішення практичних завдань вимагає уміння досить точно оцінювати параметри розподілу, особливо по малій кількості статистичних даних n . Адже ефективність і економічність управління якістю процесами визначається достовірністю визначення статистичних характеристик процесу розсіювання його показників якості за вибірковими даними невеликого обсягу. Для високої достовірності вирішення завдань щодо застосування статистичних методів у процесі управління якістю процесів необхідно знаходження ефективних статистичних оцінок параметрів статистичних моделей розподілу випадкових величин, яким відповідають розсіювання показників якості процесів, що є однією з умов управління якістю статистичними методами та описують розсіювання показників якості процесу.

Знайдемо оцінки параметрів методом найбільшої правдоподібності, для чого визначимо функцію правдоподібності K :

$$K = \ln p(\tau) = \ln \left(\prod_{i=1}^n p(\tau_i) \right) \quad (3)$$

Так як щільність розподілу моделі (1) має вид:

$$p(\tau) = \frac{1}{\alpha\beta} \left(\frac{\tau}{\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}-1} e^{-\left(\frac{\tau}{\beta}\right)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (4)$$

$$\text{то } \ln(p(\tau_i)) = \ln \frac{1}{\alpha\beta} + \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \ln \frac{\tau_i}{\beta} - \left(\frac{\tau_i}{\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (5)$$

відповідно:

$$K = \ln p(\tau) = n \ln \frac{1}{\alpha\beta} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \ln \tau_i - n \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \ln \beta - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\tau_i}{\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (6)$$

Знаходимо часткові похідні за параметрами:

$$\begin{cases} \frac{\partial K}{\partial \alpha} = \frac{n}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \sum_{i=1}^n \tau_i - \frac{n}{\alpha^2} \ln \beta - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\tau_i}{\beta} \right)^{1/\alpha} \ln \left(\frac{\tau_i}{\beta} \right) \\ \frac{\partial K}{\partial \beta} = -\frac{n}{\alpha\beta} + \frac{\beta^{-1/\alpha}}{\alpha} \sum_{i=1}^n (\tau_i)^{1/\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

Оцінку β можна знайти з рівнянь, знаючи оцінку α :

$$\beta = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i)^{1/\alpha}}{n} \right)^\alpha \quad (8)$$

Оцінку α можна знайти з таблиць для гама-функцій з рівності:

$$C_v = \Gamma(1 + \alpha), \quad (9)$$

де C_v – це варіація.

$$C_v = \sqrt{n \sum_{i=1}^n p_i^2 - 1}; \quad p_i = \frac{\tau_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i} \quad (10)$$

Знаючи оцінку α , можна отримати оцінку β з рівняння (8).

Знайдемо оцінки параметрів методом моментів, прирівнюючи теоретичні та емпіричні моменти відповідного порядку, отримаємо оцінку β :

$$\beta = \frac{M_1}{\Gamma(1+\alpha)} \quad (11)$$

Оцінку α знайдемо з таблиць для гама-функцій виходячи з рівності (8), при чому:

$$C_v = \frac{S}{M_1} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (\tau_i - M_1)^2}{n-1}}}{M_1}, \quad (12)$$

де M_1 - вибіркове середнє значення; S - стандартне вибіркове відхилення.

$$M_1 = \frac{\sum n_i \tau_i}{n}.$$

Отже, маємо оцінки параметрів моделі (1), отримані двома методами, аналогічно робиться і для моделі (2). Класичні методи статистичного оцінювання – метод максимальної правдоподібності і метод моментів, орієнтовані на наявності великого об'єму статистичної інформації. Тобто із збільшенням інформації про об'єкт оцінювання ризику, збільшується достовірність оцінювання, проте на практиці їх часто застосовують при будь-яких обсягах інформації, у тому числі і малих, що призводить до значних помилок при вирішенні прикладних завдань.

Висновки

1. Проаналізовано підходи до оцінювання ризиків функціонування систем.
2. Запропоновано в якості оцінювання ризиків функціонування систем фізико–статистичну математичну модель за критерієм інтенсивності відмов - двопараметричну модель Вейбула–Гнеденка.
3. Застосовано ефективні оцінки параметрів математичної моделі надійності безвідмовного функціонування системи.
4. Статистичний аналіз ефективності та зміщеності знайдених оцінок з застосуванням методу Монте-Карло показав, що оцінки, знайдені методом найбільшої правдоподібності більш ефективні та менш зміщені.

Список використаних джерел:

1. Непомнящий О. Основні принципи і складові ризик-менеджменту при будівництві та експлуатації споруд: державно-управлінський аспект / О. Непомнящий // *Публічне урядування*. – 2019. – № 1 (16). – С. 154–169.
2. Білявська О. Б. Концептуальні принципи управління ризиками в державному управлінні [Електронний ресурс] / О. Б. Білявська // *Державне управління: удосконалення та розвиток*. – 2010. – № 6. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2010_6_5. (дата звернення: 12.05.22)
3. Zwikael O. The Effectiveness of Risk Management: An Analysis of Project Risk Planning Across Industries and Countries. / O. Zwikael, M. Ahn // *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*. – 2011. – № 31. – Р. 25–37.
4. Managing the Risks of Risk Management / L. Castro[et al.] // *Journal of Decision Systems*. – 2008. – № 17. – Р. 501–521.
5. Лебединець В. О. Оцінювання, аналізування та управління ризиками для якості на фармацевтичному підприємстві / В. О. Лебединець, С. М. Коваленко // *Управління, економіка та забезпечення якості в фармації*. – 2011. – № 6 (20). – С. 10–15.
6. Методика управління ризиками для системи управління якістю при виготовленні виробів медичного призначення / А. М. Денисенко [и др.] // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2019. – Вип. 3 (55). – С. 25–30.
7. Михно П. Державне управління ризиком як механізм мінімізації невизначеності [Електронний ресурс] / П. Михно // *Збірник наукових праць Національної академії державного управління при Президентові України*. – 2012. – Вип. 2. – С. 90–100. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnadu_2012_2_12. (дата звернення 15.05.22)
8. Methodology for assessing risk in innovation investments / V. Novelini [et al.] // *Rev. Adm. UFSM, Santa Maria*. – 2019. – Vol. 12, № 5. – Р. 953–974.
9. Головач Т. В. Ризик менеджмент: зміст і організація на підприємстві / Т. В. Головач, А. Б. Грушевицька, В. В. Швид // *Вісник Хмельницького національного університету*. – 2009. – № 3, т. 1. – С. 157–163.
10. Стрельбіцька Н. Уніфікований міжнародний стандарт ризик-менеджменту як відповідь на виклики глобалізації [Електронний ресурс] / Н. Стрельбіцька // *Соціально-економічні проблеми і держава*. – 2011. – Вип. 2 (5). – Режим доступу : <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11snpnvh.pdf> (дата звернення 22.05.22)
11. Дуднева Ю. Е. Стандартизація ризик-менеджменту як шлях підвищення його ефективності / Ю. Е. Дуднева // *Ринкова трансформація економіки : стан, проблеми, перспективи : матеріали V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (Харків, 8-10 квітня 2014 р.)*. – 2014. – С. 84–86.
12. Morgan J. RiskMetrics [Electronic resource] / J. Morgan, P. Reuters. – Access mode : <http://www.jpmorgan.com/RiskManagement/RiskMetrics/RiskMetrics.html> (date of access 22.05.22)
13. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. – Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.
14. Лагунова І. А. Сутність та принципи концепції ризик-менеджменту / І. А. Лагунова // *Актуальні проблеми державного управління*. – 2018. – № 1. – С. 44–51.
15. Оцінювання ризиків функціонування системи управління якістю (ДСТУ ISO 9001:2015) вищих навчальних закладів / Р. М. Тріщ, Г. С. Кіпоренко, Н. І. Кім, А. М. Денисенко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2016. – Вип. 2 (38). – С. 133–136.

References:

9. Nepomniashchy, O 2019, 'Osnovni pryntsypy i skladovi ryzyk-menedzhmentu pry budivnytstvi ta ekspluatatsii sporud: derzhavno-upravlinskyi aspekt', *Publichne uriaduvannia*, no. 1 (16), pp. 154-169.
10. Biliavska, OB 2010, 'Kontseptualni pryntsypy upravlinnia ryzykamy v derzhavnomu upravlinni' *Derzhavne upravlinnia: udoskonallennia ta rozvytok*, № 6, viewed 12 May 2022, <http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2010_6_5>.
11. Zwikael, O & Ahn, M 2011, 'The Effectiveness of Risk Management: An Analysis of Project Risk Planning Across Industries and Countries', *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, no. 31, pp. 25-37.
12. Castro, L, Guliás, V, Abalde, C & Jorge, J 2008, 'Managing the Risks of Risk Managemen', *Journal of Decision Systems*, no. 17, pp. 501-521.
13. Lebedynets, VO & Kovalenko, SM 2011, 'Otsiniuvannia, analizuvannia ta upravlinnia ryzykamy dlia yakosti na farmatsevtichnomu pidpriemstvi', *Upravlinnia, ekonomika ta zabezpechennia yakosti v farmatsii*, no. 6 (20), pp. 10-15

14. Denysenko, AM, Hrinchenko, HS, Burdeina, VM & Lys, YuS 2019, 'Metodyka upravlinnia ryzykamy dlia systemy upravlinnia yakistiu pry vyhotovlenni vyrobiv medychnoho przyznachennia', *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no. 3(55), pp. 25-30.
15. Mykhno, P 2012, 'Derzhavne upravlinnia ryzykom yak mekhanizm minimizatsii nevyznachenosti', *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii derzhavnoho upravlinnia pry Prezidentovi Ukrainy*, no. 2, pp. 90-100. viewed 15 May 2022, <http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnadu_2012_2_12>.
16. Novelini, V et al. 2019, 'Methodology for assessing risk in innovation investments' *Rev. Adm. UFSM, Santa Maria*, vol. 12, no. 5, pp. 953-974.
17. Holovach, TV, Hrushevytska, AB & Shvyd, VV 2009, 'Ryzik menedzhment: zmist i orhanizatsiia na pidpriemstvi', *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, no. 3, vol. 1, pp. 157–163.
18. Strelbitska, N 2011, 'Unifikovanyi mizhnarodnyi standart ryzik-menedzhmentu yak vidpovid na vyklyky hlobalizatsii', *Sotsialno-ekonomichni problemy i derzhava*, no. 2 (5), viewed 22 May 2022, <<http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11snynvh.pdf>>.
19. Dudnieva, YuE 2014, 'Standartyzatsiia ryzik-menedzhmentu yak shliakh pidvyshchennia yoho efektyvnosti', *Rynkova transformatsiia ekonomiky : stan, problemy, perspektyvy*, pp. 84-86.
20. Morgan, J & Reuters, P 1996, 'Risk Metrics' *Technical Document*. viewed 22 May 2022, <<http://www.jpmorgan.com/RiskManagement/RiskMetrics/RiskMetrics.html>>.
21. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainyskyi naukovy- doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2019, *Menedzhment ryzykiv. Pryntsypy ta nastanovy (ISO 31000:2018, IDT)*, DSTU ISO 31000:2018 [Chynnyi vid 2019-01-01].
22. Lahunova, IA 2018, 'Sutnist ta pryntsypy kontseptsii ryzik-menedzhmentu', *Aktualni problemy derzhavnoho upravlinnia*, no. 1, pp. 44-51.
23. Trishch, RM, Kiporenko, HS, Kim, NI & Denysenko, AM 2016, 'Otsiniuvannia ryzykiv funktsionuvannia systemy upravlinnia yakistiu (DSTU ISO 9001:2015) vyshchykh navchalnykh zakladiv', *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, no. 2 (38), pp. 133-136.

Стаття надійшла до редакції 12 липня 2022 року

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ПАЛИВОПОДАЧІ ПАРОВИХ КОТЛІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

© Канюк Г.І., Мезеря А.Ю., Хоменко В.В., Василюк Т.Ю., Фурсова Т.М.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Канюк Геннадій Іванович: 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: 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.

Хоменко Віктор Віталійович: ORCID: 0000-0001-5355-1250; homenkoviktor1990@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Василюк Тетяна Юхимівна: ORCID: 0000-0002-2148-8645; vasylycz.t.y@uipa.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: 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.

В статті проведено аналіз та удосконалено систему виміру та контролю (регулювання) параметрів систем спалювання палива в топках парових котлів теплових електростанцій, а саме витрати твердого палива (пило-вугільної суміші) та активаторів горіння, які підвищують ефективність спалювання низькосортних палив без суттєвої модернізації топок та інших елементів парових котлів. Показано метод підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла, заснований на одночасному вимірюванні частоти обертання і обертаючого моменту на валу пилосоживильника і дальшому обчисленні фактичного значення витрати палива в мікропроцесорній обчислювальній системі на основі диференціального рівняння динаміки ротора пилосоживильника. Показано можливість удосконалення математичної моделі котельного агрегату як об'єкта керування. У модель включені параметри активатора горіння, що покращує процес спалювання низькосортного палива. Наведені недоліки технології використання активаторів горіння, основним з яких є необхідність точного дозування присадок залежно від кількості і якості палива. Визначено можливий діапазон ефективності використання активатора горіння, залежно від його витрати (залежність зміни умовної витрати палива від умовної витрати активатора горіння при спалюванні вугілля). Визначено можливий економічний ефект при використанні активаторів горіння, а саме підвищення коефіцієнту корисної дії при спалюванні низькосортних палив. Наведена функціональна схема системи автоматичного керування процесом подачі палива та активатора горіння в топку котла теплових електростанцій. Система здійснює регулювання з урахуванням кількості та якості палива, що спалюється в топці котельних агрегатів теплових електростанцій.

Ключові слова: вимірювання, паливо, активатор горіння, паровий котел.

Kanjuk G.I., Mezerya A.Yu., Homenko V.V., Vasilets T.Yu., Fursova T.M. «Increasing the accuracy of measuring and controlling the parameters of fuel supply systems of steam boilers at power plants».

The article analyzes and improves the system for measuring and controlling (regulating) the parameters of fuel combustion systems in the furnaces of steam boilers of thermal power plants, namely the consumption of solid fuel (pulverized coal mixture) and combustion activators, which increase the efficiency of burning low-grade fuels without significant modernization of furnaces and other parts steam boilers. A method is shown for improving the accuracy of measuring and regulating the supply of solid fuel to the boiler furnace, based on the simultaneous measurement of the rotational speed and torque on the dust feeder shaft and subsequent calculation of the actual value of dust consumption in a microprocessor computer system based on the differential equation of the dust feeder rotor dynamics. The possibility of improving the mathematical model of the boiler unit as a control object is shown. The model includes the parameters of the combustion activator, which improves the process of burning low-grade fuel. The shortcomings of the technology of using combustion activators are given, the main of which is the need for an accurate dosage of additives depending on the quantity and quality of the fuel. The possible range of efficiency of using the combustion activator depending on its consumption is determined (the dependence of the change in the conditional fuel consumption on the conditional consumption of the combustion activator during coal combustion). The possible economic effect is determined when using combustion activators, namely, the increase in efficiency when burning low-grade fuels. A functional diagram of the automatic control system for the process of supplying fuel and a combustion activator to the boiler furnace of thermal power plants is presented. The system adjusts taking into account the quantity and quality of fuel burned in the furnace of boiler units of thermal power plants.

Keywords: measurement, fuel, combustion activator, steam boiler.

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

Перспективним напрямом підвищення ефективності спалювання низькосортного палива є використання присадок-активаторів, що покращують процес горіння [1]. Випробування активаторів горіння на енергоблоках України показали, що використання присадок-активаторів на основі анаклариду призводить до підвищення ефективності спалювання низькосортних палив (зменшення втрат з механічним та хімічним недопалом) та зменшення витрати дорогого природного газу [1, 2,3]. При випробуваннях енергоблоку №1 Зміївської ТЕС з використанням активатора горіння «анакларид» підвищення ККД енергоблоку склало 3-4 %, що еквівалентно зменшенню витрати палива на 4 т/год при виробленні тієї ж встановленої електричної потужності [1]. Це відкриває широкі можливості для суттєвої економії палива на пиловугільних теплових електростанціях.

Загальна встановлена потужність енергоблоків ТЕС України складає близько 20 тис. МВт. При цьому річний економічний ефект від впровадження технологій спалювання низькосортних палив з використанням присадок-активаторів міг би становити близько 4 млрд. грн. на рік [1].

Основним завданням ефективного використання активаторів горіння є необхідність точного вимірювання витрат палива та присадок та не менш точної підтримки їх у заданих діапазонах залежно від якості палива та потужності енергоблоку. У існуючих системах регулювання ці параметри вимірюються і регулюються мало точно.

Таким чином, виникає необхідність удосконалення системи вимірювання та подачі твердого палива та присадок-активаторів з метою підвищення ефективності їх використання. Також актуальним завданням є удосконалення системи автоматичної подачі активаторів горіння в топку котла, яка максимально враховувала б якість і кількість палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню удосконалення котельного обладнання електростанцій присвячено багато наукових праць. Визначені можливі резерви ефективного керування котельними установками [4, 5]. Економічність котла підвищується за рахунок модернізації та удосконалення систем спалювання палива [6, 7], в тому числі низькосортних [2, 3, 8]. Визначається та враховується вплив якості палива на ефективність роботи котлів [9, 10, 11]. Удосконалюються системи регулювання котельних установок [12, 13]. Використовується сучасні методи математичного моделювання [14, 15, 16, 17] та враховуються обмеження [18]. Отримані наукові та технічні рішення дозволили значно підвищити ефективність роботи котельних агрегатів, але питання використання низькосортних палив з'явилося відносно недавно. Це пов'язано з подорожчанням палива та погіршенням стану паливно-енергетичного комплексу країни, що підвищує актуальність досліджень в цьому напрямку.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою досліджень є підвищення ефективності спалювання низькосортних палив в топках котлів теплових електростанцій шляхом удосконалення системи виміру та контролю витрат твердого палива та активаторів горіння в усьому діапазоні нормальних режимів експлуатації.

Виклад основного матеріалу

В автоматизованій системі керування режимами роботи парового котла (АСК ПК) теплових електростанцій точність вимірювання витрати палива має велике значення, оскільки основна функція АСК ПК полягає в підтримці максимально економічного режиму його роботи. Якщо методи вимірювання витрат рідкого і газоподібного палива є досить точними, то вимірювання витрат твердого палива становить складну технічну задачу. Це пов'язано з тим, що існуючі методи засновані на визначенні витрати палива за вимірюваною швидкістю обертання ротора пиложивильника. Однак витрата палива визначається не тільки частотою обертання ротора, але й щільністю заповнення вугільним пилом міжлопатевого простору, що в існуючій системі ніяк не фіксується, але може істотно змінюватися залежно від випадкових процесів стану і руху пилу в бункерах (неконтрольовані сходи, обвалення тощо) [12, 15].

З метою підвищення точності вимірювання витрати вугільного пилу можна використовувати спосіб вимірювання, заснований на одночасному вимірюванні частоти обертання і обертаючого моменту на валу пиложивильника і дальшому обчисленні фактичного значення витрати пилу в мікропроцесорній обчислювальній системі на основі диференціального рівняння динаміки ротора пиложивильника (рис. 1):

$$M_{об}^{пж} = J_{пж} \frac{d\omega_{пж}}{dt}, \quad (1)$$

де:

$$J_{пж} = J_p + J_{вп} \quad (2)$$

наведений момент інерції пиложивильника, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

J_p – момент інерції ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$J_{вп}$ – момент інерції маси вугільного пилу, що перебуває в просторі між лопатями $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\omega_{пж}$ – кутова швидкість ротора пиложивильника, рад/с ;

$M_{об}^{пж}$ – обертаючий момент на валу пиложивильника, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

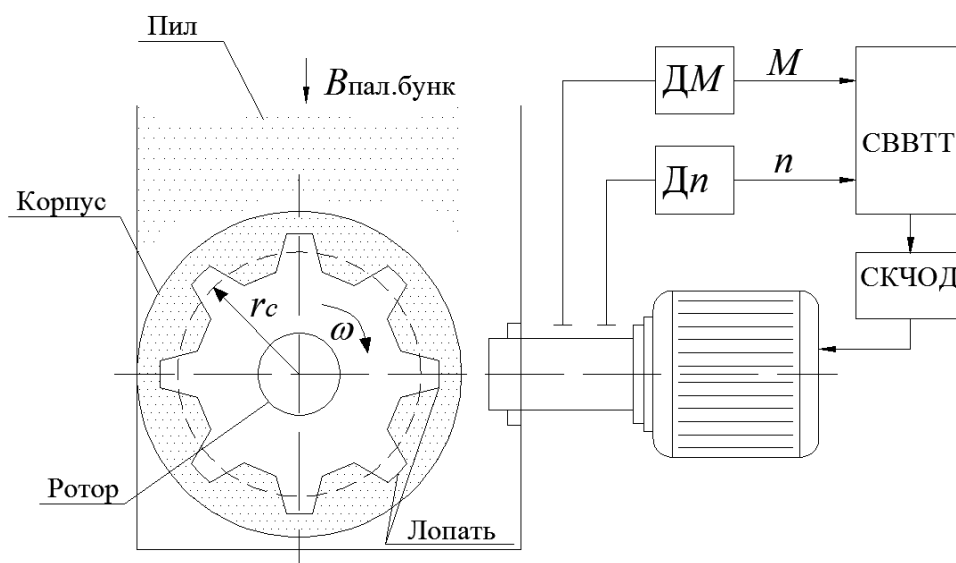


Рис. 1 – Конструктивна схема лопаткового поживильника

За одночасного паралельного вимірювання частоти обертання ротора ω (і диференціюванні в реальному масштабі часу вимірального сигналу з метою визначення кутового прискорення $d\omega/dc$) та обертаючого моменту на валу $M_{об}^{пж}$ (наприклад, за допомогою тензометричного датчик із цифровим виходом) в обчислювальній системі вимірального блока з рівняння (1) може бути визначено реальне поточне значення наведеного моменту інерції:

$$J_{пж} = \frac{M_{об}^{пж}}{(d\omega/dc)} \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (3)$$

Оскільки значення моменту інерції ротора J_p є постійною величиною (конструктивна характеристика ротора), то зі співвідношення (2) може бути визначено реальне поточне значення моменту інерції маси вугільного пилю, що перебуває в цей момент у просторі між лопатями пилопоживильника:

$$J_{вп} = J_{пж} - J_p, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (4)$$

що, у свою чергу, визначається співвідношенням:

$$J_{вп} = m_{вп} \cdot r_c^2, \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \quad (5)$$

де: $m_{вп}$ – маса вугільного пилю, кг; r_c – радіус середньої окружності міжлопаткового простору, м.

За співвідношенням (4) обчислюється поточне значення маси вугільного пилю:

$$m_{вп} = J_{вп} / r_c^2, \text{ кг} \quad (6)$$

і реальне значення витрати пиловугільного палива:

$$B_{пал} = m_{вп} / t_{об} = m_{вп} \frac{\omega}{2\pi}, \quad (7)$$

де

$$t_{об} = 2\pi / \omega \quad (8)$$

– час одного оберту ротора пилопоживильника.

Структурну схему мікропроцесорного вимірювального блока, що реалізує обчислювальну процедуру (4)-(8) на основі показів датчиків швидкості D_ω та обертаючого моменту D_M , і входить до складу системи автоматичного регулювання (САК) витрати палива, яке подається лопатевим пиложивильником, наведено на рис. 2. А на рис. 3. показано схему регулятора продуктивністю пиложивильника [15].

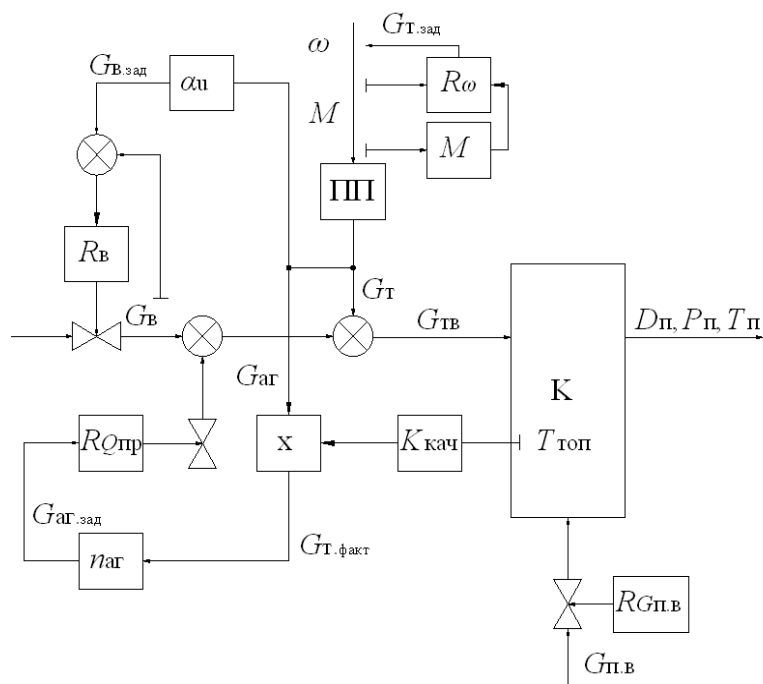


Рис.2 – Схема САК подачі палива та анаклариду

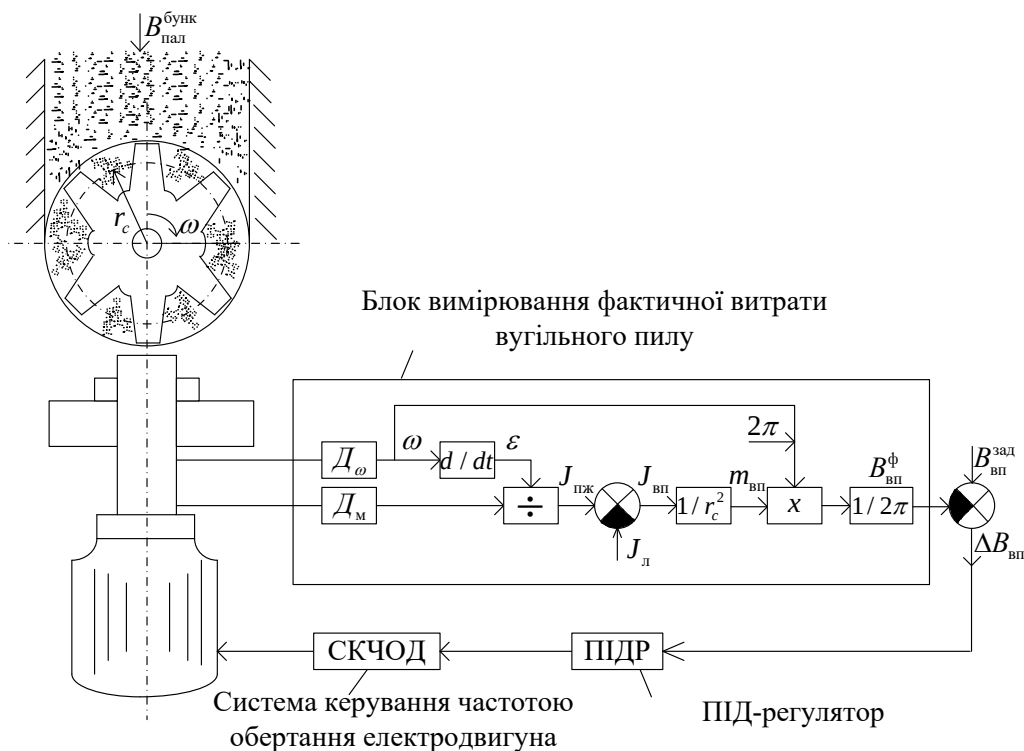


Рис.3 – Регулятор продуктивністю пиложивильника

Такий спосіб визначення поточного значення витрати пиловугільного палива забезпечує широкі можливості для практичної реалізації систем ефективного керування паровими котлами, оскільки без точного вимірювання витрати палива створювати і впроваджувати реальні системи такого класу технічно не можливо.

У попередніх дослідженнях наведено результати випробувань енергоблока №1 Зміївської ТЕС потужністю 200 МВт і витратою вугільного палива 100 т/год із використанням присадок-активаторів на основі анаклариду, які розроблені і виробляються НПП «Адіоз» (м. Київ) [1]. Випробування, опрацювання результатів та експертний висновок про ефективність розроблених присадок виконувалися за особистої участі автора роботи. Під час випробувань установлено, що використання присадок-активаторів на основі анаклариду приводить до підвищення ефективності спалювання низькосортних палив (зменшення втрат з механічним і хімічним недопалом) і зменшення витрати дорогого природного газу, необхідного для підсвічування смолоскипа. Ефект, приблизно, досягається за рахунок спалювання смолоскипа під дією вмісту в анаклариді спиртоводневих з'єднань, підвищення температури в ядрі горіння і відповідно – ступеня вигорання палива. Під час випробувань енергоблока №1 Зміївської ТЕС із використанням анакларидів підвищення ККД енергоблока склало 3-4%, що еквівалентно зменшенню витрати палива на 4 т/год у процесі вироблення тієї ж установленної електричної потужності. Це відкриває широкі можливості для істотної економії палива на пиловугільних теплових електростанціях.

Однак істотним недоліком розглянутих вище технологій є необхідність точного дозування присадок залежно від кількості і якості палива, які в існуючих системах досить точно обмірювані бути не можуть. І хоча самі присадки подаються в топку рівномірно в часі прецизійними гідравлічними дозаторами, випадкові флуктуації кількості і якості палива, неминучі в реальних існуючих технологічних системах, при цьому ніяк не враховуються. За недостатньої кількості присадок описаного вище ефекту не має, а в разі передозування – процес спалювання може навіть погіршитися (рис. 4). Цей чинник істотно обмежує можливості широкого практичного використання описаних вище технологій [1].

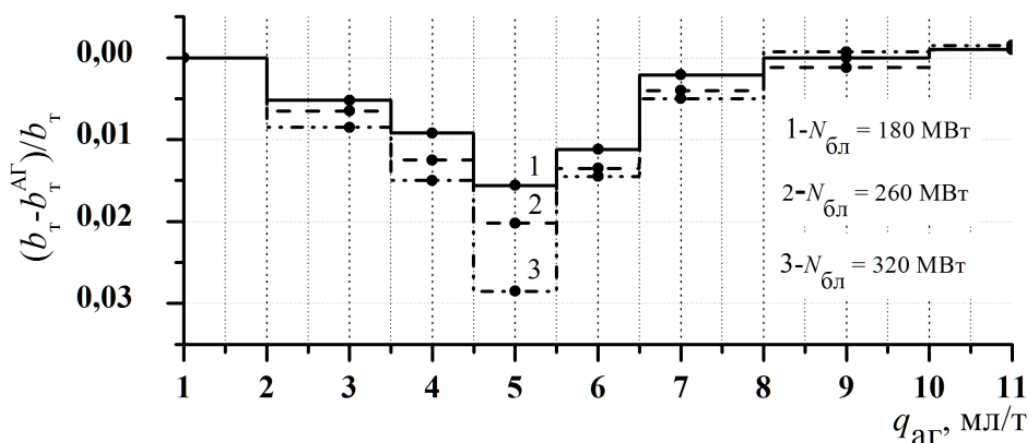


Рис. 4 – Залежність зміни умовної витрати палива від умовної витрати активатора горіння при спалюванні вугілля марки А(Т)

Підвищення точності вимірювання поточного значення витрати пиловугільного палива дозволяє синтезувати енергозберігаючу САК процесом спалювання палива в ПК із використанням присадок-активаторів. Функціональну схему такої САК наведено на рис. 5 [12].

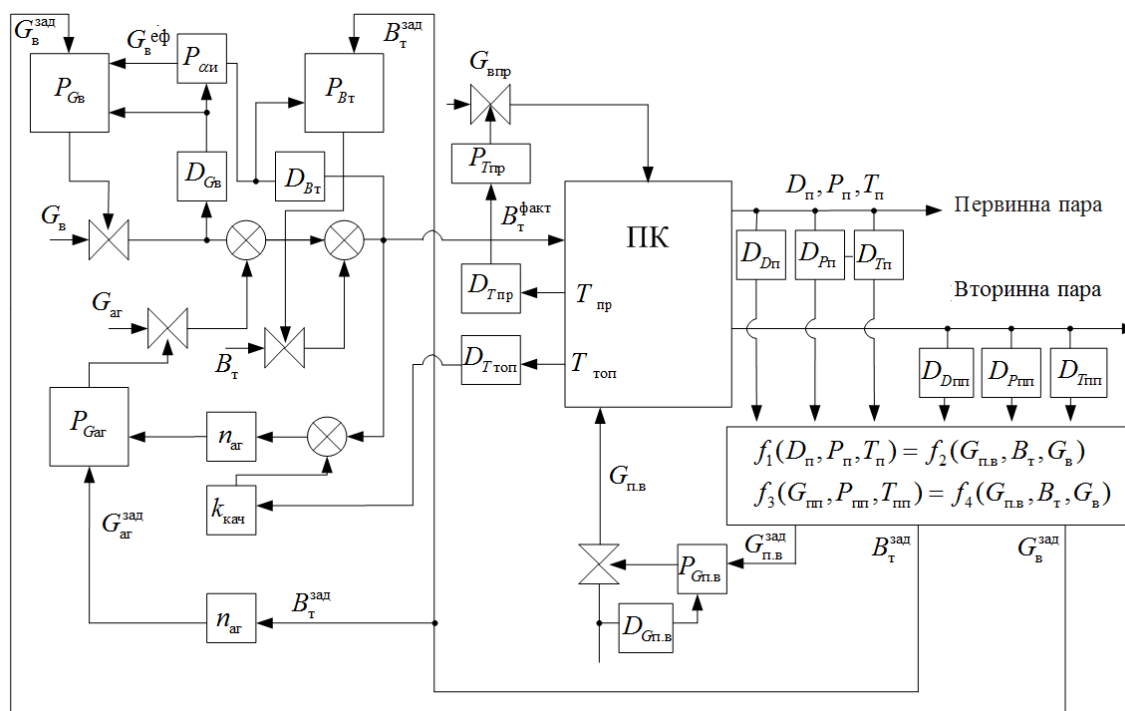


Рис. 5 – Функціональна схема САК процесом спалювання палива з використанням присадок-активаторів

До існуючої АСК, що має регулятори подачі живильної води ($P_{Гж.в}$), палива ($P_{Впал}$) і повітря ($P_{Гпов}$) (два останніх забезпечують типове регулювання співвідношень «паливо-повітря» і коефіцієнта надлишку повітря (α_n)) уводиться система точного вимірювання реального поточного значення витрати вугільного пилу ($D_{Впал}$), що істотно підвищує ефективність існуючого, типового регулятора співвідношення «паливо-повітря». Крім того, використовується система подачі присадкою-активатором з регульованим прецизійним дозатором. Дозатор керується регулятором витрати активатора ($P_{аг}$), що одержує керуючий сигнал на необхідну $G_{аг}^{зад}$ кількість, і відпрацьовує цей сигнал, відповідним чином регулюючи режим роботи дозатора. Необхідна кількість присадок визначається за фактичною витратою вугільного пилу $B_{пал}$, що вимірюється запропонованим способом, і нормою присадок ($n_{аг}$) з урахуванням корекції за якістю палива (рис. 4). Коефіцієнт якості ($K_{як}$) може бути побічно визначено за вимірюваним значенням температури в топці $T_{топ}$ (чим вища якість палива, тим, за інших рівних умов, вища температура в топці). Таким чином, забезпечується прецизійне регулювання витрати присадок-активаторів відповідно до реальної кількості палива, що подається до пальників, і забезпечуються умови його ефективного спалювання.

Висновки

Запропоновано метод підвищення точності вимірювання та регулювання подачі твердого палива в топку котла, заснований на одночасному вимірі частоти обертання пилопоживильника та обертаючого моменту на його валу. Удосконалено математичну модель котельного агрегату як об'єкта керування. У модель включені параметри активатора

горіння, що покращують процес спалювання низькосортного палива. Визначено можливий діапазон ефективності використання активатора горіння, залежно від його витрати.

Розроблено систему автоматичного керування процесом подачі палива та активатора горіння в топку котла теплових електростанцій. Регулювання витрати активатора горіння здійснюється з урахуванням кількості та якості палива, що спалюється в топці.

Список використаних джерел:

1. Звіт НДР за темою госпдоговору з ТОВ «НВП «АДІОЗ» (м. Київ) № 11-10 : Обробка та аналіз результатів теплових балансових випробувань котла ТП-100 енергоблоку 200МВт Зміївської ТЕС. – Харків : УПА. – 2012. – 28с.
2. Капустянський А.О. Результати експертних випробувань котла ТПП-210-А Трипільської ТЕС при спалюванні твердого палива з додаванням каталізатора горіння / А.О. Капустянський, Й.С. Мисак // Енергетика та електрифікація. – 2012. – № 12 (352). – С. 3–8.
3. Вольчин И. А. Испытания активаторов горения на котлоагрегате ТП–100 / И. А. Вольчин, А. Ю. Провалов // Енергетика та електрифікація. – 2012. – № 6 (346). – С. 32–42.
4. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
5. 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.
6. Мисак Й. С. Підвищення економічності роботи котлів за рахунок модернізації РПП / Й. С. Мисак, М. Ф. Заяць // Современная наука : сб. науч. ст. – 2012. – № 3 (11). – С. 15–21.
7. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт / В. В. Белый, С. В. Порозов, В. В. Васильев, А. А. Дектерев // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 299–312.
8. Мисак Й. С. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив: навч. посіб / Й. С. Мисак, Я. М. Гнатишин, Я. Ф. Івасик. – Львів : Львівська політехніка, 2002. – 135 с.
9. Капустянский А. А. Метод аналитического определения перерасхода топлива на пылеугольных котлах / А. А. Капустянский // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – № 6 (112). – С. 8–14.
10. Голышев Л. В. Влияние качества твердого топлива на ограничение номинальной мощности энергоблока / Л. В. Голышев // Теплоэнергетика. – 2001. – № 7. – С. 19–22.
11. Мисак Й. С. Вплив якості палива на техніко-економічні показники котельних установок ТЕС / Й. С. Мисак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація. – Львів, 2000. – № 399. – С. 89–96.
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. Анисимов М. Т. Автоматизація контролю якості вугілля / М. Т. Анісімов, В. В. Овсяников // Уголь Украины. – 2007. – № 11. – С. 23–25.
14. Канюк Г. И. Математическое моделирование парового котла для задач энергосберегающего управления / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідом. наук.-техн. зб. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – № 2 (29). – С. 52–66.
15. Пат. 82810 UA, F22B35/00. Энергосберегающая автоматизованная система управления котельным агрегатом тепловых электростанций / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, К. В. Лаптінова. – № u 201302030 ; заявл. 19.02.13 ; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.
16. Пономарев А. А. Модель газоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования / А. А. Пономарев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 3 (61). – С. 19–28.
17. Майданик М. Н. Математическое моделирование топки и поворотного газохода котла П-50Р при совместном сжигании твердого и газообразного топлива / М. Н. Майданик, Э. Х. Вербовацкий // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 37–42.
18. Ковриго Ю. М. Повышение эффективности регулирования котлов путем учета технологических ограничений / Ю. М. Ковриго, Б. В. Фоменко, А. С. Бунке // Теплоэнергетика. – 2012. – № 2. – С. 58–63.

References

1. Zvit NDR za temoyu gospdogovoru z TOV NVP ADIOZ (Kiyiv) no. 11-10: Obrobka ta analiz rezultativ teplovih balansovih viprobuvan kotla TP-100 energobloku 200MVt Zmivskoyi TES 2012, Ukrainka inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv.
2. Kapustyanskiy, AO & Misak, JS 2012, 'Rezultati ekspertnih viprobuvan kotla TPP-210-A Tripilskoyi TES pri spalyuvanni tverdogo paliva z dodavanniyam katalizatora gorinnya', *Energetika ta elektrifikaciya*, no. 12 (352), pp. 3-8.

3. Volchin, IA & Provalov, AYu 2012, 'Isptaniya aktivatorov gorennya na kotloagregate TP-100', *Energetika ta elektrifikaciya*, no. 6 (346), pp. 32-42.
4. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu, Mihajskij, DV, Laptinov, IP & Fokina, AR 2012, *Rezervy energosberegayushchego upravleniya tekhnologicheskimi processami na dejstvuyushchih TES i AES*, Tochka, Harkov.
5. Duel, MA, Kanyuk, GI & Mezerya, AYu 2013, *Razvitie sistem energosberegayushchego avtomatizirovannogo upravleniya energoproizvodstvom TES i AES Ukrainy*, Tochka, Harkov.
6. Misak, JS & Zayac, MF 2012, 'Pidvishchennya ekonomichnosti roboti kotliv za rahunok modernizaciyi RPP', *Sovremennaya nauka*, no. 3 (11), pp. 15-21.
7. Belyj, VV, Porozov, SV, Vasilev, VV & Dekterev, AA 2007, 'Issledovanie teploobmena i modernizaciya topochnoj kamery kotla P-67 bloka 800 MVt', *Teplofizika i aeromekhanika*, vol. 14, no. 2, pp. 299-312.
8. Misak, JS, Gnatisin, YaM & Ivasik, YaF 2002, *Palivni pristroyi dlya spalyvannya nizkosortnih paliv*, Lvivska politehnika, Lviv.
9. Kapustjanskij, AA 2013, 'Metod analiticheskogo opredeleniya pereraskhoda topliva na pyleugolnyh kotlah', *Energosberezhenie, energetika, energoaudit*, no. 6 (112), pp. 8-14.
10. Golyshev, LV 2001, 'Vliyanie kachestva tverdogo topliva na ogranichenie nominalnoj moshchnosti energobloka', *Teploenergetika*, no. 7, pp. 19-22.
11. Misak, JS 2000, 'Vpliv yakosti paliva na tekhniko-ekonomichni pokazniki kotelnih ustanovok TES', *Visnyk Natsionalnoho universytetu Lvivska politehnika. Teploenergetika. Inzheneriya dovkillya. Avtomatizaciya*, Lviv, no. 399, pp. 89-96.
12. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Suk, IV 2016, *Metody i modeli energosberegayushchego upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektrostancij*, Tochka, Harkov.
13. Anisimov, MT & Ovsyanikov, VV 2007, 'Avtomatizaciya kontrolyu yakosti vugillya', *Ugol Ukrainy*, no. 11, pp. 23-25.
14. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Suk, IV 2016, 'Matematicheskoe modelirovanie parovogo kotla dlya zadach energosberegayushchego upravleniya', *Adaptivni sistemi avtomatichnogo upravlinnya*, Kiyiv, no. 2 (29), pp. 52-66.
15. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu & Laptinova, KV 2013, *Energozberigayucha avtomatizovana sistema upravlinnya kotelnim agregatom teplovih elektrostancij*, UA Patent 82810, F22B35/00, № u 201302030.
16. Ponomarev, AA 2010, 'Model gazovozdushnogo trakta teploenergeticheskogo kotla kak obekta regulirovaniya', *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 3 (61), pp. 19-28.
17. Majdanik, MN & Verboveckij, EH 2011, 'Matematicheskoe modelirovanie topki i povorotnogo gazohoda kotla P-50R pri sovместnom szhiganiі tverdogo i gazoobraznogo topliva', *Teploenergetika*, no. 6, pp. 37-42.
18. Kovrigo, YuM, Fomenko, BV & Bunke, AC 2012, 'Povyshenie effektivnosti regulirovaniya kotlov putem ucheta tekhnologicheskikh ogranichenij', *Teploenergetika*, no. 2, pp. 58-63.

Стаття надійшла до редакції 04 листопада 2022 року

DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-89-96

УДК 331.4:658.562.3

**ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ПРАЦІ,
ЗГІДНО ВИМОГ МІЖНАРОДНОГО СТАНДАРТУ ISO 45001:2018****© Сороколат Н.А., Фатєєва Л.Ю.***Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:****Сороколат Наталія Андріївна (Sorocolat Nataliia)** ORCID: 0000-0002-0140-9364;

e-mail: n.a.sorokolat@gmail.com; Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Фатєєва Ліна Юрїївна (Lina Fatieieva) ORCID: 0000-0002-6460-0772; e-mail: linafat81@gmail.com;

Українська інженерно-педагогічна академія, аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Проведено аналіз вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018 на предмет необхідності проведення моніторингу, вимірювань та аналізу показників якості процесів, в результаті якого зрозуміло, що ефективність розроблення та впровадження системи управління охороною здоров'я і безпекою праці залежить від методології оцінювання якості. Проведено аналіз існуючих досліджень та публікацій з оцінювання процесів, у тому числі пов'язаних з безпекою праці на виробництві, аналіз методів оцінювання, або методів кваліметрії, аналіз статистичних методів оцінювання результатів вимірювань. Запропоновано алгоритм моніторингу, вимірювання та оцінювання процесів, який може служити типовим регламентним документом при впровадженні системи управління охороною здоров'я та безпекою праці згідно вимог стандарту ДСТУ ISO 45001:2019. На першому етапі алгоритму визначаються основні критерії, за якими буде оцінюватися той чи інший процес. На другому етапі здійснюється вибір засобів виміральної техніки, обґрунтування інтенсивності контрольних операцій, опрацювання результатів вимірювань тощо, для вирішення яких потрібно наукове та технічне обґрунтування вибору тих чи інших процедур. Також на другому етапі пропонується переводити різномірні показники якості процесів у безрозмірну величину. Для отримання оцінок показників якості процесів запропоновано застосувати функцію помилок, яка забезпечує вимоги до показників якості, дозволяє ефективно отримувати оцінки на безрозмірній шкалі, що дає можливість отримувати та збільшувати кількість статистичної інформації. В залежності від наявності статистичної інформації про оцінки якості процесів, а саме, від її кількості, з'являється можливість вибору того чи іншого математичного апарату для ефективного моніторингу, оцінювання та управління безпекою праці на виробництві.

Ключові слова: система управління; оцінювання; показник якості; функція помилок.**Sorocolat N., Fatieieva L.** "Quality assessment of the occupational safety management system processes according to the requirements of the ISO 45001:2018 international standard"

An analysis of the requirements of the ISO 45001:2018 international standard was carried out for the need for monitoring, measuring and analysing process quality indicators, as a result of which it is clear that the effectiveness of the development and implementation of the occupational health and safety management system depends on the quality assessment methodology. An analysis of existing research and publications on the evaluation of processes, including those related to occupational safety in production, an analysis of evaluation methods or qualitative methods, and an analysis of statistical methods of evaluation of measurement results were carried out. An algorithm

for monitoring, measuring and evaluating processes is proposed, which can serve as a standard regulatory document for the implementation of a health and safety management system in accordance with the requirements of the DSTU ISO 45001:2019 standard. At the first stage of the algorithm, the main criteria are defined, according to which this or that process will be evaluated. At the second stage, the selection of measuring equipment, justification of the intensity of control operations, and processing of measurement results are carried out, etc., for the solution of which scientific and technical justification of the choice of certain procedures is required. Also, at the second stage, it is proposed to convert the various process quality indicators into a dimensionless value. To obtain estimates of process quality indicators, it is proposed to apply the error function, which meets the requirements for quality indicators and allows obtaining estimates on a dimensionless scale, which makes it possible to obtain and increase the amount of statistical information. Depending on the availability of statistical information on process quality assessments, namely, on its quantity, it becomes possible to choose one or another mathematical apparatus for effective monitoring, assessment and management of occupational safety in production.

Keywords: management system; assessment; quality indicator; error function.

Постановка проблеми

У сучасних умовах посилюється процес адаптації законодавства України до міжнародного і європейського законодавства. Разом з тим примножується використання в Україні світового досвіду й поглиблення міжнародного співробітництва в сфері безпеки праці, результатом чого має стати підвищення промислової безпеки, запобігання аваріям та нещасним випадкам, посилення профілактики виробничого травматизму та професійної захворюваності. Необхідним інструментом для інтеграції України з ЄС і для підвищення результативності дій суб'єктів господарювання щодо запобігання травматизму є використання в Україні стандартів, які запроваджені Міжнародною Організацією із Стандартизації (ISO).

1. Стандарт ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT)» встановлює вимоги до системи управління охороною здоров'я і безпекою праці (ОЗіБП), а також містить настанови щодо їх застосування, щоб дати змогу організації створити безпечні та здорові умови праці на робочому місці, запобігаючи травмам і погіршенню стану здоров'я, що пов'язані з виробництвом, та активно вдосконалюючи свої показники діяльності у сфері ОЗіБП.

2. Для ефективного вирішення питань забезпечення безпеки праці на підприємстві необхідно, щоб були розроблені та науково обґрунтовані методики та процедури оцінювання безпеки праці, вони повинні бути уніфіковані та мати статус нормативного документа. Аналіз вимог ДСТУ ISO 45001:2019 підтверджує необхідність оцінювання стану безпеки праці. Так, наприклад у розділах стандарту вказано, що:

- Розділ 6.1.2.2 Методологія та критерії для оцінки ризиків у галузі ОЗіБП повинні бути визначені організацією з урахуванням їх сфери дії, характеру та своєчасності. Документована інформація, пов'язана з цими методами та критеріями, повинна керуватися та зберігатися;

- Розділ 9.1.1 Щоб забезпечувати досягнення очікуваних результатів системи управління ОЗіБП, слід здійснювати моніторинг, вимірювання та аналіз процесів. Організація повинна оцінювати показники в галузі ОЗіБП та визначати результативність системи управління ОЗіБП. Організація повинна визначати методи моніторингу, вимірювання, аналізу та оцінки показників, наскільки це застосовне, щоб гарантувати придатні результати та критерії, відповідно до яких організація оцінюватиме показники в галузі ОЗіБП.

Моніторинг, вимірювання та аналіз можуть стосуватися або подій на виробництві, або ефективності наглядових заходів. Моніторинг можна визначити як нагляд за умовами праці. Вимірювання є ключовою частиною кількісної оцінки даних (наприклад, вимірювання температури повітря у приміщенні). Аналіз, у свою чергу, належить до вивчення даних для виявлення взаємозв'язків.

Для ефективного управління необхідні більш досконалі і економічні методи збору та обробки інформації. Однак, самі методи оцінювання у стандарті не регламентовано, і кожне підприємство самостійно зустрічається з проблемою визначення механізму оцінювання стану безпеки праці. Для прогнозування та мінімізації шкідливих чинників необхідно здійснювати їх оцінки і оцінки повинні мати кількісну оцінку.

У статті пропонується оцінювати процеси системи управління ОЗіБП статистичними методами, тобто отримувати оцінки одиничних показників процесів протягом певного часу та оцінювати отриманий часовий ряд. Іншими словами, отримати динамічні характеристики оцінок процесів протягом їх функціонування. Це дозволить вирішувати завдання з прогнозування безпеки та ризиків праці на виробництві. Методи оцінювання об'єктів різної природи відносяться до галузі науки – кваліметрії

Оцінювання динамічних характеристик процесів можливе з застосування статистичних методів. Але головне завдання, це вибір математичного апарату для отримання надійних оцінок. Як правило, застосовуються два математичних апарати математичної статистики, а саме, методи параметричних статистик, які базуються на законах розподілу випадкових величин та методи не параметричних статистик, які не потребують знання закону розподілу. Під випадковою величиною пропонується приймати одиничні оцінки параметрів процесів, отримані методами вимірювання. Обидві групи методів можуть ефективно застосовуватись для вирішення практичних завдань у кваліметрії, але їх ефективність залежить від кількості наявної статистичної інформації. Тобто, вибір того, чи іншого методу залежить від кількості одиничних показників процесів, які отримані методами вимірювання контрольованих показників процесів на виробництві.

Як відомо, з теорії математичної статистики, для застосування методів параметричних статистик потрібно менша кількість статистичної інформації в порівнянні з методами непараметричних статистик. Але, у свою чергу, для застосування методів параметричних статистик потрібно знати закон розподілу випадкових величин, що потребує опрацювання великої кількості статистичної інформації та застосування значних наукових досліджень.

Отже, алгоритм оцінювання якості процесів повинен складатися з ряду процедур (регламентів), які можуть стати основою нормативного документу, що дозволить регламентувати процедури оцінювання та моніторингу якості процесів ОЗіБП, та підвищити ефективність впровадження на підприємстві Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці згідно вимог стандарту ДСТУ ISO 45001:2019.

Таким чином, проблема обґрунтування методів аналізу динаміки змін кількісних показників шкідливих чинників на підприємстві відповідно до вимог міжнародних стандартів є актуальною і має безпосередній вплив на контроль небезпечних умов праці на підприємстві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз існуючих досліджень та публікацій можна розділити на три частини, а саме: аналіз публікацій з оцінювання процесів, у тому числі пов'язаних з безпекою праці на виробництві; аналіз методів оцінювання, або методів кваліметрії; аналіз статистичних методів оцінювання результатів вимірювань.

Методологія оцінювання процесів системи управління якістю, відповідно до вимог стандарту ISO 9001 достатньо фундаментально, повно та обґрунтовано представлена у науковій

роботі [1], у якій регламентуються методи та методики кількісного оцінювання якості процесів, які мають різну природу, тобто технологічні процеси, процеси забезпечення та управління. Застосування методів кваліметрії та статистичних методів для оцінювання процесів безпеки праці на машинобудівному виробництві обґрунтовано та представлено у науковій роботі [2], де застосовуються кваліметричні методи оцінювання та контрольні карти Шухарта з метою отримати оцінювання показників безпеки та гігієни праці протягом часу їх функціонування.

В роботах [3-6] пропонуються покрокові методики застосування кваліметричних та статистичних методів оцінювання якості процесів різної природи, апробація яких представлена на прикладах у числовому вигляді. Представлені методики регламентують застосування функцій бажаності для отримання оцінок показників якості процесів у безрозмірному виді.

Серед публікацій, у яких представлено дослідження безпеки та гігієни праці на виробництві, є публікації, пов'язані з застосуванням математичного апарату математичної статистики, а саме методу групового урахування аргументів та методів регресійного аналізу [7-9]. Дані методи застосовуються у тому сенсі, що підбирають функцію регресії, застосовуючи методи планування експерименту та регресійного аналізу та використовують її як закономірність, яка характеризує тенденцію зміни показників якості процесів протягом певного періоду часу.

У роботах [10-12], для оцінювання показників процесів безпеки та гігієни праці застосовуються різні функціональні залежності між вимірними показниками небезпечних чинників та їх оцінкою на безрозмірній шкалі. При цьому розглядаються їх переваги та недоліки і можливості застосування для різних об'єктів оцінювання.

Здійснений аналіз сучасних методів кількісного оцінювання умов праці на виробництві показав, що вони спрямовані на визначення показників результативності та ефективності в заданий час [13,14], однак становить інтерес дослідження динаміки змін кількісних показників шкідливих чинників на підприємстві, з метою прийняття управлінських дій.

Метою роботи є обґрунтування методів та розробка алгоритму аналізу кількісних показників шкідливих чинників на підприємстві у часі.

Виклад основного матеріалу

Для виконання вимог міжнародного стандарту [15] щодо здійснення моніторингу, вимірювань та оцінювання процесів системи безпеки та гігієни праці необхідно розробити систему вимірювань та постійного контролю кількісних показників якості процесу, тобто кількісних показників результатів вимірювань контрольованих чинників. Усі чинники, які впливають негативно на здоров'я працюючих визначені та нормовані відповідними галузевими та міжнародними нормативними документами (технічними регламентами). Національна метрологічна система забезпечує єдність та достовірність вимірювань, забезпечуючи законодавчі, технічні, методичні та організаційні процедури. Організаційні процедури контролю та моніторингу контрольованих чинників регламентуються системою управління охороною здоров'я та безпекою праці на кожному підприємстві, яка являється унікальною. У результаті зв'язків між розглянутими системами появляються можливості ефективного моніторингу та оцінювання якості процесів ОЗіБП на будь якому підприємстві, яке прийняло політику та цілі безпечної праці працівників.

Пропонується алгоритм моніторингу, вимірювання та оцінювання процесів, який може служити типовим регламентним документом при впровадженні системи управління охороною здоров'я та безпекою праці згідно вимог стандарту ДСТУ ISO 45001:2019.

На першому етапі алгоритму необхідно визначити основні критерії, за якими буде оцінюватися той чи інший процес. Тобто, на будь якому виробництві існують різні види робочих місць, які характеризуються тим чи іншим небезпечним або шкідливим чинником для життя та здоров'я робітників. Необхідно їх визначити існуючими методами, серед яких експертні методи, методи мозкового штурму, методи статистик та інші. Першочергово, як за основу, можна скористатися існуючими нормами, які регламентовані відповідними нормативними документами.

Другий етап забезпечується процедурами вимірювання визначених контрольованих чинників. На другому етапі необхідно забезпечити процеси вимірювання чинників, що потребує процесів забезпечення засобами вимірювальної техніки, методичного забезпечення процесу вимірювання та контролю, методичного забезпечення опрацювання результатів вимірювань та інше.

При виконанні другого етапу алгоритму виникає ряд завдань, які потребують крім організаційних, наукові обґрунтування тих чи інших варіантів прийняття рішень. Так, наприклад, виникають питання, пов'язані з вибором засобів вимірювальної техніки, обґрунтуванням інтенсивності контрольних операцій, опрацюванням результатів вимірювань та інших, для вирішення яких потрібно наукове та технічне обґрунтування вибору тих чи інших процедур.

В статті пропонується переводити різнорозмірні показники якості процесів у безрозмірну величину. Така процедура дозволить привести усі результати вимірювань до однієї безрозмірної величини, що дасть змогу об'єднувати їх та значно збільшувати обсяги інформації у вигляді результатів вимірювань. Збільшення обсягів інформації, в свою чергу, дозволить застосовувати статистичні методи з більшою ефективністю. Адже, як відомо, ефективність статистичних методів контролю та управління залежить від кількості статистичної інформації.

У якості залежності, за допомогою якої будемо перетворювати різнорозмірні показники у безрозмірну величину пропонується застосовувати функцію помилок. Функція помилок являється неелементарною та застосовується в математичній фізиці, математичній статистиці для вирішення деяких практичних завдань. Недавно застосування функції помилок стало можливим завдяки розвитку комп'ютерної техніки. Функція помилок має вид [16]:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (1)$$

Графічний вид функції помилок представлено на рисунку 1.

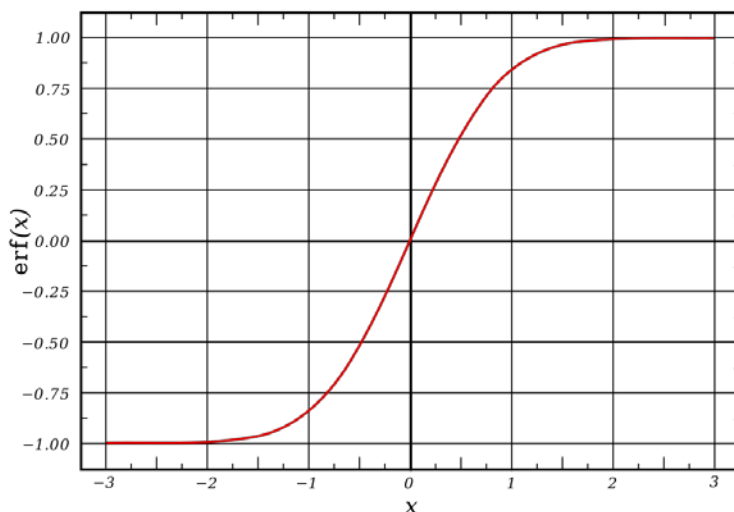


Рис. 1 – Графічний вид функції помилок (1)

Зважаючи на деякі характеристики якості об'єктів кваліметрії, а саме: оцінка показника якості знаходиться в межах $0 \leq y(x) < 1$; швидкість зміни функції по краях інтервалу оцінювання значно менша за швидкість її зміни по середині інтервалу. Зважаючи на рисунок 1, можна зробити висновок, що функція (1) обґрунтована для отримання оцінок якості процесів.

Для отримання оцінок якості процесів на безрозмірній шкалі в межах $0 \leq y(x) < 1$ отримаємо наступну функціональну залежність:

$$y(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(-2 + 4 \frac{x-a}{b-a} \right), \quad (2)$$

де $\operatorname{erf}(x)$ – функція помилок, a – найменше можливе допустиме значення показника якості процесу (регламентоване нормативами), b – найбільше можливе допустиме значення процесу; x – вимірне значення показника якості процесу. Зауважимо, що функція $y(x)$ в точці a приймає значення близьке до нуля, а в точці b – близьке до одиниці. Графічний вид функції (2) представлено на рисунку 2.

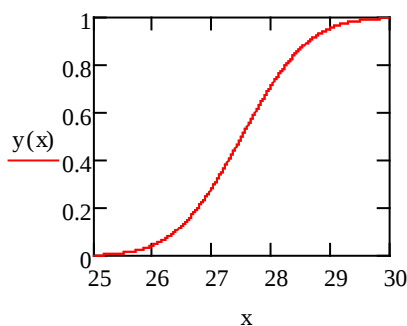


Рис. 2 – Графічний вид функції (2)

Як показано на рисунку 2, оцінка показника якості змінюється від 0 до 1, а вісь (x) обмежена гранично допустимими значеннями показника якості процесу, які задаються. У випадку, показаному на рисунку 2, найкращий показник якості тоді, коли він близький до верхньої гранично допустимої межі. У випадку, коли найкращий показник знаходиться у нижньої гранично допустимої межі, то застосовується обернена функція:

$$y'(x) = 1 - \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(-2 + 4 \frac{x-a}{b-a} \right) \right) \quad (3)$$

Використовуючи функції (2) та (3), в залежності від того до якої гранично допустимої межі прямує показник якості процесу, отримуємо часовий ряд оцінок показників якості процесу за одним критерієм. Графічний вид часового ряду оцінок показників якості процесу протягом певного часу показано на рисунку 3.



Рис. 3 – Графічний вид часового ряду оцінок показників якості процесу протягом певного часу

Отже, застосовуючи функції (2) та (3) отримуємо часовий ряд безрозмірних показників якості процесу, який можна оцінювати відповідними статистичними методами.

Третій етап алгоритму моніторингу, вимірювання та оцінювання якості процесів характеризується вибором того чи іншого математичного інструменту, в залежності від кількості існуючої статистичної інформації, розуміння фізичної суті поведінки процесу та існуючої інформації про типові процеси, які вивчалися раніше. Тобто, для наступного етапу оцінювання необхідно мати достатню кількість інформації про процес, яку необхідно збирати, оцінювати та опрацьовувати, з метою вирішення практичних задач, а саме прогнозування та упередження впливу негативних чинників на життя та здоров'я працюючих.

Висновки

Проведено аналіз вимог міжнародного стандарту ISO 45001:2018 на предмет необхідності проведення моніторингу, вимірювань та аналізу показників якості процесів, в результаті якого зрозуміло, що ефективність розроблення та впровадження системи управління ОЗіБП залежить від методології оцінювання якості.

Для отримання оцінок показників якості процесів пропонується застосувати функцію помилок, яка забезпечує вимоги до показників якості, дозволяє ефективно отримувати оцінки на безрозмірній шкалі, що дає можливість отримувати та збільшувати кількість статистичної інформації.

В залежності від наявності статистичної інформації про оцінки якості процесів, а саме, від її кількості, з'являється можливість вибору того чи іншого математичного апарату для ефективного моніторингу, оцінювання та управління безпекою праці на виробництві.

Список використаних джерел:

1. Тріщ Г. М. Розробка методології оцінювання процесів систем управління якістю підприємств з урахуванням вимог міжнародних стандартів : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02/ Галина Михайлівна Тріщ. – Харків, 2014. – 162 с.
2. Черняк О. М. Удосконалення кваліметричних методів оцінювання безпеки та гігієни праці у виробничих приміщеннях : дис. ... канд. техн. наук : 05.01.02 / Олена Миколаївна Черняк. – Харків, 2019. – 200 с.
3. Ginevičius R. Quantitative assessment of quality management systems' processes / R. Ginevičius, H. Trishch, V. Petraškevičius // *Economic Research-Ekonomika Istraživanja*. – 2015. – Vol. 28, no. 1. – P. 1096–1110.
4. Тріщ Г. М. Аналіз стану системи управління якістю в динаміці / Г. М. Тріщ, М. В. Денисенко // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – № 1/15. – С. 14–16.
5. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case / R. Ginevičius, R. Trišč, R. Remeikienė, A. Zielińska, G. Strikaitė-Latušinskaja // *Journal of International Studies*. – 2022. – Vol. 15, no. 1. – P. 230–249.
6. Qualimetric method of assessing risks of low quality products / R. Trishch, O. Nechuiviter, K. Dyadyura, O. Vasilevskiy, I. Tsykhanovska, M. Yakovlev // *MM Science Journal*. – 2021. – № 4. – P. 4769–4774.
7. Кружилко О. Є. Удосконалення комплексної оцінки стану охорони праці на підприємствах : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Олег Євгенович Кружилко. – Київ, 2001. – 22 с.
8. Шапошникова С. В. Удосконалення інформаційної моделі системи управління охороною праці / С. В. Шапошникова, В. В. Чигарьов // *Вісник приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. – 2011. – № 22. – С. 277–283.
9. Гунченко О. М. Удосконалення системи управління охороною праці на машинобудівних підприємствах : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Оксана Миколаївна Гунченко. – Луганськ, 2007. – 27 с.
10. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry / R. Trishch, O. Cherniak, O. Kupriyanov, V. Luniachek, I. Tsykhanovska // *Engineering Management in Production and Services*. – 2021. – Vol. 13, no. 2. – P. 107–114.
11. Quantitative assessment of working conditions in the workplace / O. Cherniak, R. Trishch, N. Kim, S. Ratajczak // *Engineering Management in Production and Services*. – 2020. – Vol. 12, no. 2. – P. 99–106.
12. Застосування функціональної залежності для багатокритеріального оцінювання безпеки праці, як об'єкта кваліметрії / О. М. Черняк, Н. А. Сороколат, І. О. Багаєв, Л. Ю. Фатєєва // *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. – 2022. – № 1 (19). – С. 76–84.

13. Черняк О. М. Застосування методу інтегрування для оцінювання якості об'єктів кваліметрії / О. М. Черняк, Н. А. Сороколат, І. В. Каницька // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 4 (6). – С. 93–98.
14. Черняк О. М. Графоаналітичний метод визначення комплексного показника якості об'єктів кваліметрії / О. М. Черняк, Н. А. Сороколат, Каницька І. В. // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – 2020. – № 4 (14). – С. 169–175.
15. ДСТУ ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT) Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. – На заміну ДСТУ OHSAS 18001:2010 ; чинний від 2021-01-01. – Вид. офіц. – Київ : [б. в.], 2019.
16. Методи математичної фізики / С. С. Піх [та ін.]. – Львів : ЛНУ ім. Франка, 2011. – 404 с.

References

1. Trishch, GM 2014, 'Development of a methodology for evaluating the processes of enterprise quality management systems taking into account the requirements of international standards', *Kand.tekh.n. thesis*, Kharkiv.
2. Cherniak, OM 2019, Improvement of qualimetric methods of evaluation occupational safety and health in industrial premises, *Kand.tekh.n. thesis*, Kharkiv.
3. Ginevičius, R, Trishch, H & Petraškevičius, V 2015, 'Quantitative assessment of quality management systems' processes', *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, vol. 28, no. 1, pp. 1096-1110.
4. Trishch, GM & Denisenko, MV 2014, 'Analysis of the state of the quality management system in dynamics', *Technological audit and production reserves*, vol. 15, no. 1, pp. 14-16.
5. Ginevičius, R, Trišć R, Remeikienė, R, Zielińska, A & Strikaitė-Latušinskaja, G 2022, 'Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case', *Journal of International Studies*, vol. 15, no. 1, pp. 230-249.
6. Trishch, R, Nechuviter, O, Dyadyura, K, Vasilevskyi, O, Tsykhanovska, I & Yakovlev, M 2021, 'Qualimetric method of assessing risks of low quality products', *MM Science Journal*, no. 4, pp. 4769-4774.
7. Kruzylo, OE 2001, 'Improving the comprehensive assessment of the state of labor protection at enterprises', *Kand.tekh.n. abstract*, Kyiv.
8. Shaposhnikova, SV & Chyharev, VV 2011, 'Improvement of the information model of the labor protection management system', *Bulletin of the Priazov State Technical University. Technical sciences*, no. 22, pp. 277-283.
9. Gunchenko, OM 2007, Improvement of the labor protection management system at machine-building enterprises', *Kand.tekh.n. abstract*, Luhansk.
10. Trishch, R, Cherniak, O, Kupriyanov, O, Luniachek, V & Tsykhanovska, I 2021, 'Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry', *Engineering Management in Production and Services*, no. 13 (2), pp. 107-114.
11. Cherniak, O, Trishch, R, Kim, N & Ratajczak, S 2020, 'Quantitative assessment of working conditions in the workplace', *Engineering Management in Production and Services*, no. 12 (2), pp. 99-106.
12. Cherniak, O, Sorocolat, N, Bahaiev, I & Fatieieva, L 2022, 'Application of functional dependence for multi-criterial assessment of labor safety as an object of qualimetry', *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, no. 1 (19), pp. 76-84.
13. Cherniak, O, Sorocolat, N & Kanytska, I 2020, 'Application of the integration method for assessing the quality of qualimetry objects', *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*, no. 4 (6), pp. 93-98.
14. Cherniak, O, Sorocolat, N & Kanytska, I 2020, 'Graph analytical method for determining the complex quality indicator of qualimetry objects', *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, no. 4 (14), pp. 169-175.
15. Derzhavne pidpriemstvo Ukrainyskyi naukovy- doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2019, *Systemy upravlinnya okhoronoyu zdorovya ta bezpekoyu pratsi. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannya*, [DSTU ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT), DSTU ISO 45001:2019 (ISO 45001:2018, IDT), Kyiv.
16. Pikh, SS, Popel, OM, Rovenchak, AA & Talianskyi, II 2011, *Metody matematychnoyi fizyky* [Methods of mathematical physics], Lviv.

Стаття надійшла до редакції 12 липня 2022 року

DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-97-103

УДК [621.313.322:681.51]:006.85

АНАЛІЗ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

© Чеботарьов А.М., Бондаренко Ю.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Чеботарьов Антон Миколайович (Chebotarev Anton): ORCID: 0000-0003-2751-5293; chebotaryov.an@gmail.com; аспірант заочного відділення, Українська інженерно-педагогічна академія, кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Бондаренко Юрій Олександрович (Bondarenko Yuri): ORCID: 0000-0003-2751-5293; yuri94bondarenko@gmail.com; аспірант, Українська інженерно-педагогічна академія, кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті проведено аналіз існуючого нормативно-методичного забезпечення ефективності елементів низькопотенційних комплексів теплових і атомних електростанцій, до яких відносяться конденсатори, циркуляційні та конденсатні насоси, ежектори, системи автоматичного керування окремим обладнанням та загальна система керування низькопотенційним комплексом. Визначено роль системи низькопотенційного комплексу в загальному балансі енергоблока електростанції за різними системами водопостачання. Проведено аналіз наявності в існуючій нормативно-технічній та нормативно-методичній документації нормативних методів забезпечення ефективності роботи систем низькопотенційного комплексу теплових і атомних електростанцій та його основних елементів, які гарантовано змогли б забезпечити мінімальні сумарні втрати енергії при дотриманні необхідних показників надійності, екологічності, безпеки та інше. Встановлено, що в існуючій нормативно-технічній документації є методи та методики розрахунку енергоефективності роботи окремих елементів систем низькопотенційного комплексу, але бракує методик та алгоритмів визначення параметрів елементів систем низькопотенційних комплексів, які забезпечують максимальну енергоефективність як в номінальних режимах роботи енергоблоків, так і во всьому діапазоні навантажень. Не досить повно сформульовані універсальні нормативні методи структурно-параметричного синтезу енергоефективних регуляторів автоматизованих систем керування, які гарантовано змогли б забезпечити високі показники точності підтримки необхідних параметрів елементів систем НПК. Висунуто вимоги до удосконалення існуючої нормативно-технічної документації, а саме: сформулювати універсальні нормативні методи структурно-параметричного синтезу енергоефективних систем керування елементами НПК за критерієм мінімуму енергетичних втрат; системні та кількісні показники, а також методи і засоби їх гарантованого технічного забезпечення.

Ключові слова: нормативне забезпечення, низькопотенційний комплекс, енергозбереження.

Chebotarev A., Bondarenko Yu. “Analysis of the regulatory support for the efficiency of system elements of low-potential complexes at power plants”.

The article analyzes the existing regulatory and methodological support for the efficiency of elements of low-potential complexes (LPCs) of thermal and nuclear power plants, which include capacitors, circulation and condensate pumps, ejectors, automatic control systems for individual

equipment, and the general control system of a low-potential complex. The role of the system of the low-potential complex in the overall balance of the power unit of the power plant according to various water supply systems was determined. There was conducted an analysis into the existing normative-technical and normative-methodological documentation with regard to the presence of normative methods for ensuring the efficiency of the systems of the low-potential complex of thermal and nuclear power plants and its main elements, which would be guaranteed to be able to ensure minimal total energy losses in compliance with the necessary indicators of reliability, environmental friendliness, safety, etc. It was established that the existing regulatory and technical documentation contains methods and techniques for calculating the energy efficiency of individual elements of low-potential complex systems, but there is a lack of methods and algorithms for determining the parameters of elements of low-potential complex systems that ensure maximum energy efficiency both in the nominal operating modes of power units and in the entire range loads. The universal normative methods of structural-parametric synthesis of energy-efficient regulators of automated control systems, which would be guaranteed to be able to provide high accuracy indicators of maintaining the necessary parameters of the elements of LPC systems, have not been sufficiently formulated. Demands have been put forward to improve the existing normative and technical documentation, namely: to formulate universal normative methods of structural-parametric synthesis of energy-efficient control systems for the elements of the LPCs according to the criterion of minimum energy losses, system and quantitative indicators, as well as methods and means of their guaranteed technical support.

Keywords: regulatory support, low-potential complex, energy efficiency.

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

Обмеженість енергоресурсів та підвищення їх вартість в сукупності з фізичним та моральним старінням обладнання діючих теплових електростанцій (ТЕС) призвело до значного підвищення вимог щодо енергоефективності роботи електростанцій та окремих її вузлів [1]. Одним з таких енергоємних вузлів сучасних ТЕС є система низькопотенційного комплексу (НПК) [2].

До складу низькопотенційного комплексу (рис.1) сучасних електростанцій відносять [2]:

- конденсаційні установки пари (2), які включають конденсатні насоси (3), ежектори (4) з охолоджувачами (5), підігрівачи низького тиску (6);
- системи технічного водопостачання, які включають джерела водопостачання та охолоджуючі пристрої (8) (водойми, градирні, бризгальні установки та інше), циркуляційні насоси (10), трубопроводи охолоджуючої води (11), фільтри циркуляційної води (9) і систему водоводів;
- останні ступені або частини циліндрів низького тиску турбін з робочими дисками (7) та вихлопними патрубками для відпрацьованої пари (1);
- підігрівачи низького тиску систем регенеративного підігріву живильної води;
- регулюючу, запорну та вимірювальну апаратуру.

В тепловому балансі енергоблоку втрати енергії в конденсаторі складають до 50%. Це пов'язано з фізичними процесами, які описані циклом Ренкіна. З урахуванням втрат в насосах (споживана потужність насоса є втрати) та в іншому обладнанні, ця величина збільшується. Це призводить до зниження коефіцієнта корисної дії електростанції та, як наслідок, підвищенню собівартості виробленої електроенергії [3]. Сумарні втрати енергії в НПК без урахування циклу Ренкіна для енергоблоків ТЕС потужністю 300-1200 МВт складають 7-8% для систем водопостачання з водоймами-охолоджувачами та градирнями і 8-10% для систем з радіаторними та сухими градирнями [3].

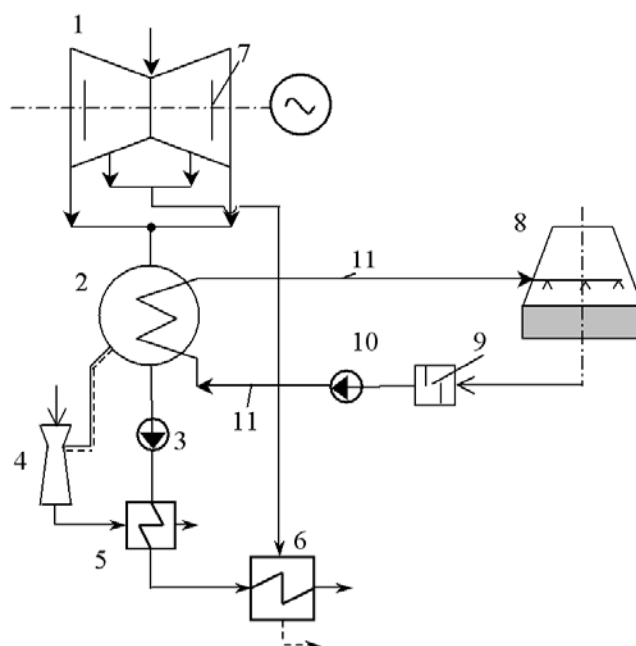


Рис. 1 – Схема НПК ТЕС і АЕС з індивідуальною системою технічного водопостачання

Підвищення ефективності роботи систем НПК енергоблоків та зниження втрат в ньому – є важлива та актуальна науково-технічна задача, рішення якої дозволить підвищити техніко-економічні показники енергоблоку, знизити собівартість виробленої електроенергії та підвищити її конкурентоспроможність на світовому ринку.

Практичні результати у вирішенні цієї задачі можна отримати, створивши науково-технічну і нормативну бази, які б забезпечили створення і впровадження енергоефективних систем автоматичного керування системою НПК, які б забезпечували мінімальні втрати енергії в НПК при дотриманні необхідних технологічних параметрів та показників надійності, екологічності, безпеки тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналізу та удосконаленню нормативного забезпечення щодо ефективності елементів систем НПК присвячено роботи вітчизняних та закордонних вчених. Так в роботі [4] проведено аналіз нормативних документів щодо забезпечення ефективної роботи насосних установок, які також використовуються в системах НПК та є основними споживачами енергії. В роботі [5] проведено аналіз нормативних документів щодо елементів систем НПК, але бракує змістового аналізу кожного документу, що ускладнює уяву про їх ефективність. Також в наукових працях увагу приділяється безпосередньо розробці методик та алгоритмів, які підвищують ефективність роботи елементів НПК та можуть бути використані при удосконаленні існуючої нормативної бази. В роботі [6] наведено шляхи підвищення ефективності роботи систем низькопотенційних комплексів електростанцій шляхом оптимального керування витратою циркуляційної води, а в роботі [7] методика оптимізації режимів роботи систем НПК за критерієм мінімуму енергетичних втрат. Також удосконалюється нормативне забезпечення енергетичного обладнання, яке може бути використане в системах НПК як перспективний метод використання енергії скидної води [8, 9].

Метою роботи є змістовий аналіз нормативного забезпечення України щодо ефективності роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій та визначення шляхів його удосконалення з метою підвищення ефективності їх роботи.

Виклад основного матеріалу

На сьогодні існує ряд нормативно-технічної документації, що стосується питань керування режимами роботи елементів НПК. В ній висвітлено питання автоматичного регулювання, підтримки необхідних технологічних процесів, настройки регуляторів, розрахунків техніко-економічних показників, а також методів і засобів забезпечення необхідної якості технологічних процесів (якість охолоджуючої води тощо). Перелік основних нормативних документів, спрямованих на вирішення цієї задачі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні нормативні документи, спрямовані на забезпечення ефективної роботи систем НПК та її елементів

№	Стандарт	Назва
1	2	3
1	ДСТУ 2226-93	Автоматизовані системи. Терміни та визначення
2	ДСТУ 2709-94	Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення.
3	ДСТУ EN ISO 20361:2016	Насоси гідравлічні та насосні агрегати. Правила випробування на шум. Класи точності 2 та 3 (EN ISO 20361:2015, IDT; ISO 20361:2015, IDT)
4	ДСТУ EN 45510-6-4:2015 (EN 45510-6-4:1999, IDT)	Настанова щодо поставок обладнання електростанцій. Частина 6-4. Допоміжне обладнання турбін. Насоси
5	ДСТУ EN 809:2015	Насоси та насосні агрегати для рідин. Загальні вимоги щодо безпеки (EN 809:1998+A1:2009; AC:2010, IDT)
6	ДСТУ EN 12162:2013	Насоси рідинні. Вимоги щодо безпеки. Методика гідростатичних випробувань (EN 12162:2001+A1:2009, IDT)
7	ДСТУ EN 16297-1:2017 (EN 16297-1:2012, IDT)	Насоси. Відцентрові насоси. Безсальникові циркуляційні насоси. Частина 1. Загальні вимоги та процедури для випробування та розрахунку показника енергоефективності (EEI)
8	ДСТУ EN 45510-6-3:2015	Настанова щодо поставок обладнання електростанцій. Частина 6-3. Допоміжне обладнання турбін. Конденсаційні установки (EN 45510-6-3:1998, IDT)
9	ДСТУ EN 45510-6-6:2015	Настанова щодо поставок обладнання електростанцій. Частина 6-6. Допоміжне обладнання турбін. Баштові охолоджувачі вологого і волого-сухого типу (EN 45510-6-6:1999, IDT)
10	ГОСТ 22247-96	Насоси відцентрові консольні для води. Основні параметри і розміри. Вимоги безпеки. Методи контролю
11	ДСТУ 6134:2009 (ISO 9906:1999)	Насоси динамічні. Методи випробувань
12	ДСТУ 3063-95	Насоси. Класифікація. Терміни та визначення
13	ГКД 34.10.401-95	Обробка циркуляційної води на теплових електростанціях. Норми витрати хімічних реагентів
14	ДСТУ 3503-97	Насоси. Основні технічні показники та характеристики рідинних насосів. Терміни, визначення та позначення
15	ГКД 34.22.502-95	Хімічні очистки конденсаторів турбін і теплообмінних апаратів на теплових електростанціях. Методичні вказівки
16	ГКД 34.30.301-95	Методика розрахунку виправлень до потужності, витраті свіжої пари й питомій витраті теплоти на відхилення параметрів і умов від номінальних для турбоагрегатів з регульованими відборами пари
17	ГКД 34.09.302-96	Достовірне оцінювання економічної ефективності механічних заходів, проведених на конденсаційних турбоагрегатах. Методика

Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

1	2	3
18	ГКД 34.11.301-93	Метрологічні характеристики обчислювальної процедури розрахунку техніко-економічних показників енергоблока теплової станції. Методика визначення
19	ГКД 34.22.601-96	Технології та обладнання систем технічного водопостачання ТЕС. Рекомендації щодо зменшення витрат води
20	ГКД 34.25.506-96	Редукційно-охолоджувальні установки (ШРОУ, РОУ, ПСШУ і ПСШУ ВП). Інструкція з експлуатації
21	ГКД 34.30.401-93	Методичні вказівки з налагодження та експлуатації водоструминних ежекторів конденсаційних установок парових турбін
22	ГКД 34.09.103-96	Розрахунок звітних техніко-економічних показників електростанції про теплову економічність устаткування. Методичні вказівки
23	ГКД 34.35.101-95	Обладнання енергетичних блоків потужністю 300 МВт і вище. Вимоги, обумовлені умовами їхньої автоматизації
24	ГКД 34.09.103-96	Розрахунок техніко-економічних показників електростанцій про теплову економічність устаткування
25	ДСТУ 4132-2002	Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги до проектування, виготовлення, постачання, монтажування та експлуатування. Звід правил
26	ДСТУ 4133-2002	Насоси відцентрові загальнопромислового застосування. Вимоги безпеки
27	ДСТУ 2582-94	Теплообмінники. Терміни та визначення
28	ДСТУ 4110-2002	Енергозбереження. Методика аналізу й розрахунку питомих витрат енергоресурсів (ANSI/IEEE 739:95, NEQ)
29	ДСТУ 3282-95	Енергозбереження установки для вакуумної деаерації води. Загальні технічні вимоги
30	ДСТУ 3626-97	Базові програмно-технічні комплекси локального рівня для розосереджених автоматизованих систем керування технологічними процесами. Загальні вимоги
31	ДСТУ 3682-98	Енергозбереження. Методика визначення повної енергоемності продукції, робіт та послуг. (ГОСТ 30583-98)

В існуючих нормативних документах розглядаються загальні вимоги щодо окремих елементів (насоси, конденсатор, деаератор та інші) систем НПК (1, 12, 14, 27, 29) та питання техніки безпеки (5, 6, 10, 26). Ці документи нормують основні характеристики обладнання, загальні вимоги техніки безпеки, терміни та визначення. Розглядаються технологічні параметри, які повинні забезпечуватися згідно технологічного процесу (13, 15, 16, 17, 22, 28). Сюди відносяться витрати рідини, пари, хімічний склад енергоносіїв та інше.

Увага приділяється питанням проектування та експлуатації елементів НПК (14, 20, 21, 25), монтажу та поставок (4, 8, 9). Крім того, регламентуються метрологічні характеристики приладів, які використовуються при визначенні параметрів (2, 10, 18), процедури випробування обладнання НПК (3, 6, 7, 11) та вимоги щодо систем автоматики (1, 2, 23, 30)

Питання ефективності роботи елементів НПК прямо або опосередковано визначені в (7, 14, 16, 17, 22, 24, 28, 29, 31). Так в (7) наведено методику визначення показників енергоефективності циркуляційних насосів, але відсутні алгоритми, як забезпечити ці показники на високому рівні. Теж саме відноситься й до (14), де наведено лише методику визначення енергетичних характеристик насосів. В (16) наведено способи розрахунку виправлень до потужності, витрати свіжої пари й питомій витраті теплоти, які необхідно вводити при відхиленні параметрів або інших умов від прийнятих за номінальні. Розглядаються способи оцінки економічної ефективності заходів, проведених на

конденсаційних турбоагрегатах (18) та техніко-економічні показники енергоблока (22, 24). Ці показники визначаються постфактум. Питання енергозбереження, які розглядаються в (28, 29, 31) стосуються лише окремих елементів та не висвітлюють методів його підвищення.

Таким чином, аналіз існуючих нормативно-технічних документів України показав, що питання визначення та автоматичної підтримки енергоефективних режимів роботи систем висвітлено недостатньо. Існують норми щодо окремих елементів систем НПК електростанцій (насоси, конденсатор та інші), але бракує нормативних документів, які б відображали норми щодо систем НПК як загальної системи. Майже відсутні практичні методики та алгоритми визначення параметрів елементів систем низькопотенційних комплексів, які забезпечують максимальну енергоефективність НПК як в номінальних режимах роботи енергоблоків, так і во всьому діапазоні навантажень. Не досить повно сформульовані універсальні нормативні методи структурно-параметричного синтезу енергоефективних регуляторів автоматизованих систем керування, які гарантовано змогли б забезпечити високі показники точності підтримки необхідних параметрів елементів систем НПК.

Для створення такої документації, необхідно виконати цикл теоретичних і експериментальних наукових досліджень, які будуть включати в себе математичне моделювання технологічного процесу елементів систем НПК, ідентифікацію математичних моделей за результатами експериментальних досліджень, структурний і параметричний синтез енергоефективних регуляторів.

Висновки. Існуюча нормативна база України щодо забезпечення енергоефективних режимів роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій не відповідає сучасним вимогам енергозбереження.

Для забезпечення високих показників енергоефективності роботи систем низькопотенційних комплексів електростанцій необхідно в нормативно-технічній та нормативно-методичній документації сформулювати універсальні нормативні методи структурно-параметричного синтезу автоматизованих систем керування елементами НПК за критерієм мінімуму енергетичних втрат. В документації по системам автоматичного регулювання НПК та окремих елементів, сформулювати системні і кількісні вимоги щодо показників, а також методи і засоби їх гарантованого технічного та метрологічного забезпечення.

Список використаних джерел:

1. Повышение эффективности энергосбережения при автоматизации энергопроизводства с использованием интегрированной АСУ ТЭС и АЭС / М. А. Дуэль, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. А. Бабенко. – Харьков : Мадрид, 2014. – 440 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. Шелепов И. Г. Теплоэнергетические установки электростанций : Исследование и расчёт низкопотенциальных комплексов ТЭС и АЭС / И. Г. Шелепов, В. К. Заруба, С. Б. Яцкевич. – Киев : УМКВО, 1993. – 280 с.
4. Анализ нормативных документов по обеспечению эффективной работы насосных установок магистральных нефтепроводов / В. Н. Князева, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, А. В. Андреев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – Харків. – Вип. 5. – 2019. – С. 71–77.
5. Князева В. Н. Анализ нормативных документов Украины по обеспечению эффективной эксплуатации элементов систем низкопотенциальных комплексов электростанций / В. Н. Князева, А. Ю. Мезеря, А. Н. Чеботарев // Topical issues of the development of modern science : The 6th International scientific and practical conference, February 12-14, 2020. – Sofia : ACCENT, 2020. – P. 553–557.
6. 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.

7. Канюк Г. И. Оптимизация режимов работы низкпотенциальных комплексов ТЭС по критерию минимума энергетических потерь / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Т. Н. Фурсова // *East European Scientific Journal* –2016. – № 6, part 2. – P. 108–111.

8. Канюк Г. І. Аналіз нормативного забезпечення систем автоматичного регулювання гідроенергетичних установок ГЕС та ГАЕС / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Є. Мельников // *Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад.* – Харків : УІПА, 2018. – № 21. – С. 120–127.

9. Канюк Г. И. Научное обоснование и нормативное обеспечение энергоэффективных режимов работы систем автоматического регулирования гидрогенераторных установок / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, В. Е. Мельников // *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В. І. Вернадського. Серія «Технічні науки».* – Київ, 2018. – Т. 29 (68), № 3, ч. 2. – С. 71–77.

References

1. Duel, MA, Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Babenko, IA 2014, *Increasing to efficiency energysave at automations energyproduction with use integrated CAD HPP and APP*, Kharkov, Madrid.

2. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Suk, IV 2016, *Metodi i modeli energosberegayushogo upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektrostancii*, Harkov, Tochka.

3. Shelepov, IG, Zaruba, VK & Yackevich, SB 1993, *Teploenergeticheskie ustanovki elektrostancii: Issledovanie i raschet nizkopotencialnih kompleksov TES i AES*, Kiev, UMKVO.

4. Knyazeva, VN, Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Andreev, AV 2019, 'Analiz normativnih dokumentov po obespecheniyu effektivnoi raboti nasosnih ustanovok magistralnih nefteprovodov', *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu Harkivskii politehnicnii institute*, Seriya Novi rishennya v suchasni tehnologiyah, Harkiv, iss. 5, pp. 71-77.

5. Knyazeva, VN, Mezerya, AY & Chebotarev, AN 2020, 'Analiz normativnih dokumentov Ukraini po obespecheniyu effektivnoi ekspluatatsii elementov sistem nizkopotencialnih kompleksov elektrostancii', *Topical issues of the development of modern science*, The 6th International scientific and practical conference, February 12-14, 2020, Sofia, Bulgaria, ACCENT, pp. 553-557.

6. Kanyuk, HI, Mezerya, AY, Chebotarov, AM & Blyznichenko, HS 2020, 'Pidvyshchennia efektyvnosti roboty system nyzkopotentsiinoho kompleksu elektrostantsii shliakhom optymalnoho keruvannia vytratoi tsyrkuliatsiinoi vody', *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, iss. 4 (52), pp. 34-39.

7. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Fursova, TN 2016, 'Optimizaciya rezhimov raboti nizkopotencialnih kompleksov TES po kriteriyu minimuma energeticheskikh poter', *East European Scientific Journal*, no. 6, part 2, pp. 108-111.

8. Kanyuk, HI, Mezerya, AY & Melnykov, VYe 2018, 'Analiz normativnoho zabezpechennia system avtomatichnoho rehuliuвання hidroheneratorykh ustanovok HES ta HAES', *Mashynobuduvannia*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, Kharkiv, no. 21, pp. 120-127.

9. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Melnykov, VYe 2018, 'Nauchnoe obosnovanie i normativnoe obespechenie energoeffektivnih rezhimov raboti sistem avtomaticheskogo regulirovaniya gidrogeneratorykh ustanovok', *Vcheni zapiski Tavriiskogo Nacionalnogo Universitetu imeni VI Vernadskogo*, Seriya Tehnicni nauki, Kyiv, vol. 29 (68), no. 3, part 2, pp. 71-77.

Стаття надійшла до редакції 17 серпня 2022 року

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОГЛИНАЮЧОЇ ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

© Кирисов І.Г., Буданов П.Ф.

Українська інженерно-педагогічна академія

Інформація про авторів:

Кирисов Ігор Геннадійович (Кирисов Игорь Геннадьевич, Kyrysov Ihor): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-8880>; e-mail: kirisovui1980@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, аспірант кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Буданов Павло Феофанович (Буданов Павел Феофанович, Budanov Pavlo): ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1542-9390>; e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті розглянуті та проаналізовані основні вимоги до тонкоплівкових сонячних елементів: наявність базового шару з більшим показником поглинання оптичного випромінювання; при утворенні гетеропереходу, необхідний відповідний широкозонний шар; забезпечення ефективного збору зарядів шляхом електричного сполучення шарів; надійність омичних контактів.

Виявлено основні складності, пов'язані з виробництвом тонких плівок, а саме з теоретичними і практичними труднощами: границі зерен впливають на рекомбінацію, струмоперенесення, дифузію й сегрегацію; існує проблема контактних явищ для структур з декількох матеріалів через необхідність електричного сполучення різних шарів сонячного елемента; точкові дефекти в тонкоплівкових сонячних елементах, недостатньо вивчені.

Визначено, що при виготовленні сонячних елементів, важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально уявляти про їх кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні й електричні властивості.

Відзначається, що при тривалій експлуатації сонячних панелей і сонячних батарей, відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії й вихідної потужності.

Запропоновано, розглянути дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних основних методів дослідження: сканувальна зондова (ємнісна) і тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; мас-спектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція; сканувальна лазерна мікроскопія

Показана також можливість застосування цілого ряду оптичних, електричних, рентгенівських та інших досліджень, для оцінки якості плівок, що становлять структуру сонячного елемента, а також їх використання, для оцінки технологічних процесів при виготовленні сонячного елемента.

Обґрунтовано, що застосування описаних методів, сприяє розробці надійних, ефективних і дешевих сонячних елементів, однак очевидно, що жоден метод діагностики, не здатний відбити всю розмаїтість інформації, щодо параметрів тонкоплівкових сонячних елементів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, метод, поглинаюча поверхня, спектр, сонячний елемент, мікроскопія

Kyrysov I., Budanov P. “Research methods of the absorbing surface of solar elements”.

The article considers and analyzes the main requirements for thin-film solar elements, namely the presence of a base layer with a high absorption coefficient of optical radiation; an appropriate wide-gap layer, which is required in the formation of a heterojunction; ensuring efficient collection of charges by electrical conjugation of layers; reliability of ohmic contacts.

The main difficulties associated with the production of thin films are identified, both theoretical and practical, namely grain boundaries affect recombination, current transfer, diffusion and segregation; there is a problem of contact phenomena for structures of several materials due to the need for electrical coupling of different layers of the solar element; point defects in thin-film solar elements are not well understood.

It is determined that when manufacturing solar elements, it is important to evaluate the quality of each of its layers at the deposition stage in order to realistically represent their crystal structure, chemical composition, optical and electrical properties.

It is noted that during long-term operation of solar panels and solar batteries, there is a significant decrease in their performance, due to the deterioration of the main parameters, which are efficiency and output power.

It is proposed to consider the study of physical processes in the structure of the semiconductor layer of a solar element, as well as the study of the physical properties of thin films for a solar element, based on the following main research methods: scanning probe (capacitive) and tunneling microscopy (spectroscopy); atomic force microscopy; fluoroscopy; electronic microanalysis; scanning electron microscopy; ellipsometry; spectroscopic ellipsometry; Auger electron spectroscopy; mass spectrometry of secondary ions; photoluminescence; scanning laser microscopy.

It also shows the possibility of using a number of optical, electrical, X-ray and other studies to assess the quality of films that make up the structure of a solar element, as well as their use to evaluate technological processes when manufacturing a solar element.

It is substantiated that the use of the described methods contributes to the development of reliable, efficient and cheap solar elements; however, it is obvious that no diagnostic method is able to reflect all the variety of information regarding the parameters of thin-film solar elements.

Keywords: converter, method, absorbing surface, spectrum, solar element, microscopy.

Вступ

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

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

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

Аналіз проблеми погіршення параметрів сонячної панелі (СП) показав, що це визначається, нестабільністю вихідних параметрів сонячних елементів (фотоелектричних перетворювачів), з яких збирається сонячна панель. Це може бути викликано наступними факторами [8]: низькою якістю матеріалів і їхнє виробництво; ступенем герметизації панелі і якістю захисних властивостей плівки й т.д.

До більше серйозних наслідків при експлуатації СП, призводить виникнення пошкоджувальних дефектів, (відколи, мікротріщини, макропори, локальні неоднорідності) на сприймаючій поверхні напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача (ФЕП), які приводять до підвищення внутрішнього опору [9].

Причини появи таких пошкоджувальних дефектів, на поверхні сонячних елементів (СЕ), можуть первісно розрізнятися та мати різну природу, однак вони усі істотно впливають на внутрішню структуру напівпровідникового шару ФЕП. У свою чергу, зміну в структурі напівпровідникового шару ФЕП, викликають відхилення встановлених внутрішніх параметрів (напруги холостого ходу, струму короткого замикання, внутрішнього опору) та впливають на вихідну потужність і ККД СЕ.

Тому, вивчення фізичних процесів, на поверхневому рельєфі напівпровідникового шару ФЕП, при яких відбувається пошкодження й руйнування напівпровідникової структури ФЕП, є актуальною проблемою, з якої зіштовхуються виробники й споживачі СП.

При моделюванні приймалися наступні допущення: вольт-амперні (ВАХ) та вольт-ватні характеристики (ВВХ) моделювалися без урахування часткового затінення сприймаючої поверхні ФЕП і без можливого її пошкодження. Дані допущення дають можливість застосовувати тільки класичні аналітичні вирази для моделювання характеристик ФЕП. Основною причиною відхилень ВАХ і ВВХ, є труднощі точного виміру як послідовного і шунтового опорів, так і активної площі сонячних елементів.

Крім того, процеси моделювання в моделях сонячного елемента, проводилося з обмеженнями та допущеннями щодо сприймаючої поверхні, які істотно впливають на точність, нелінійність і нестабільність ВАХ і ВВХ. Отже, даний підхід вносить істотні похибки в розрахунках електрофізичних величин СЕ і не дає можливості застосовувати, повною мірою, аналітичні класичні вирази для моделювання характеристик СЕ. Крім того, необхідно відзначити, що точність моделювання ВАХ і ВВХ, залежить від можливих технологічних розкидів для кожного СЕ. Тому виявлення відповідності характеристик СЕ, представлених виробником і реальними характеристиками СЕ при його експлуатації, з врахуванням різних зовнішніх і внутрішніх факторів впливу на сприймаючу поверхню СЕ, є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [18] запропонована модель ФЕП, для різних режимів роботи, з урахуванням впливу тільки зовнішніх факторів. У моделі, запропоновані аналітичні співвідношення між вихідними параметрами ФЕП (струмом навантаження, вихідною напругою) і зовнішніми умовами: інтенсивністю сонячного випромінювання, температури й енергетичною освітленістю. Як недолік даної моделі необхідно відзначити, що такі модельні параметри як: зворотний струм насичення, послідовний і паралельний шунтовий опір, розраховувалися тільки на основі паспортних даних сонячного елемента. При цьому, реальні дані, які істотно залежать від стану поверхневого рельєфу напівпровідникового шару ФЕП, у моделі розглядалися з різними допущеннями й обмеженнями.

У роботі [17] розглянута модель СЕ, що враховує співвідношення між такими параметрами як: номінальна й максимальна потужність; напруга холостого ходу й

номінальна напруга; струм короткого замикання й номінальний струм. Розглянута модель дозволяє розрахувати вихідну потужність і ККД СЕ. Однак, у запропонованих аналітичних виразах моделі, уводяться обмеження та похибки про ідеально гладкі поверхні тобто без поверхневих дефектів, що може викликати погрішності й відхилення при розрахунку реальних вихідних параметрів СЕ.

У роботі [18], наведені результати експериментальних досліджень вихідних параметрів СП: напруги холостого ходу, струму короткого замикання, вихідної потужності з урахуванням освітленості й температури в різних кліматичних і температурних умовах. Крім цього, виконані оцінки температурних коефіцієнтів напруги холостого ходу (НХХ) і струму короткого замикання (СКЗ). Експериментально підтверджено, що СКЗ прямо залежить від освітленості, а НХХ змінюється несуттєво через логарифмічний характер залежності від параметра фотоструму. Як недолік, необхідно відзначити, що в роботі показано, що температурні коефіцієнти НХХ і СКЗ для сонячної станції істотно більше, ніж для сонячного монокристалічного елемента. Однак не досліджені причини такої розбіжності і його впливу на величину вихідної потужності.

У роботі [17], показано, що на вихідну потужність фотоелектричних модулів впливають різні фактори, такі як часткове затінення, сонячна інсоляція, температура та конфігурація фотоелектричних масивів. Ці фактори, викликають зниження ефективності та надійності вироблення електроенергії у ФЕП.

У роботі [14], проведено дослідження впливу неоднорідного часткового затінення на характеристики ФЕП. При цих умовах, фотоелектричні ВАХ ФЕП стають більше складними, з більш ніж одним піком. Тому, дуже важливо, при цих умовах, розрахувати максимально можливу потужність. Для цього в роботі використовувалось моделювання характеристик ФЕП на основі MATLAB. Як недолік, у роботі показано, що в умовах часткового затінення зменшуються струм навантаження та теплові втрати, однак не досліджені причини такого зниження від стану поверхні ФЕП.

У роботі [15], отримана імітаційна модель, що дозволяє відображати сімейство ВАХ і ВВХ сонячних модулів залежно від рівня інтенсивності сонячного випромінювання, температури, значень СКЗ, НХХ, внутрішніх опорів СЕ, діодного параметра. Як недолік необхідно відзначити, що розроблена модель, описує реальний сонячний модуль, лише з деяким ступенем наближення, з урахуванням прийнятих припущень.

Метою роботи є розгляд і аналіз методів дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для фотоелектричного перетворювача.

Виклад основного матеріалу

Розгляд і аналіз основних вимог до тонкоплівкових сонячних елементів (СЕ) показав, що до них відносяться:

- наявність базового шару з більшим показником поглинання оптичного випромінювання;
- для утворення гетеропереходу необхідний відповідний широкозонний шар;
- електричне сполучення шарів повинне забезпечувати ефективний збір зарядів;
- надійні омичні контакти.

Однак виробництво тонких плівок зв'язано як з теоретичними, так і практичними труднощами.

Основні складності пов'язані з тим, що:

- границі зерен впливають на рекомбінацію, струмоперенесення, дифузію та сегрегацію;

- існує проблема контактних явищ для структур з декількох матеріалів через необхідність електричного сполучення різних шарів СЕ;

- точкові дефекти в тонкоплівкових СЕ недостатньо вивчені.

При виготовленні СЕ важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально представляти їхню кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні та електричні властивості.

Для оцінки якості плівок, що становлять структуру СЕ, можливе застосування цілого ряду оптичних, електричних, рентгенівських і ін. досліджень. Деякі з них використовуються для оцінки технологічних процесів при виготовленні СЕ.

Очевидно, що жоден метод діагностики не здатний відобразити всю різноманітність інформації щодо параметрів тонкоплівкових СЕ.

Розглянемо основні методи дослідження та вивчення фізичних властивостей тонких плівок для СЕ.

Застосування описаних методів сприяє розробці надійних, ефективних і дешевих СЕ.

Метод сканувальної зондової мікроскопії (SPM). SPM [19] - загальна назва групи методів, у яких використовується зонд для дослідження поверхні та електрофізичних параметрів СЕ. Вид взаємодії між зондом і матеріалом визначає тип SPM. Розрізнення цих методів досягає $\sim \text{\AA}$ і залежить від геометрії вістря зонда та характеру поверхні.

Сканувальна тунельна мікроскопія (STM) [20]. Принцип дії STM заснований на фіксації величини струму, що протікає в зазорі вістря зонда - поверхні зразка. За рахунок різниці електричних потенціалів, прикладених до поверхні зразка та до зонду, встановлюється тунельний струм, що експоненційно залежить від відстані вістря зонду - поверхні зразка. В якості зондів для STM звичайно використовується заточений металевий дріт. Зображення поверхні формується або поперечним скануванням і виміром струму (картина струму), або використанням петлі зворотного зв'язку, що підтримує струм постійним, за рахунок пересування зонда ближче або далі від поверхні (топографічне зображення). Висока чутливість тунельного струму до невеликих варіацій відстані дозволяє одержувати зображення з розрізненням порядку розміру атома. Аналізуватися можуть тільки метали та напівпровідники, оскільки необхідно наявність струму між зондом і зразком.

Сканувальна тунельна спектроскопія (STS). Дозволяє одержувати інформацію про електронну структуру поверхні. Вивчення залежності тунельного струму від прикладеної напруги називається $I-V$ і $dI/dV-V$ характеристики – приклад STS.

Атомна силова мікроскопія (AFM) [20]. Для одержання зображення фіксується сила взаємодії між вістря зонда та досліджуваною поверхнею. Радіус закруглення зонда становить порядку 10 нм і відповідає за розрізнення AFM методів. Існують три основних режими AFM: контактний, безконтактний і напівконтактний (режим «обстукування»). Під час сканування в контактному режимі вістря зонда сковзає (аналогічно профілометру) по поверхні. При контактному режимі зонд торкається поверхні. Взаємодія між зондом і зразком відштовхуюче та регулюється керуючою програмою. При безконтактному режимі зонд перебуває в декількох $\text{\AA}$ над поверхнею, взаємодія є притягуючою. У напівконтактному режимі зонд коливається з певною частотою, «обстукує» поверхню. Калібрування проводиться на стандартних зразках з відомою топографією.

Хоча STM метод більше чутливий за рахунок квадратичної залежності величини струму, що протікає, від відстані вістря-зразок, за допомогою AFM можна аналізувати майже всі типи матеріалів, включаючи діелектрики, органічні й біологічні об'єкти. В AFM режимі зображення звичайно легше одержати, чим в STM.

Експериментальні дані при стандартному AFM і STM аналізі являють собою матрицю даних про вертикальне положення z зонда в масиві позицій (x, y) . Графічне подання цих даних (топографія зразка) схоже на зображення сканувальної електронної мікроскопії (SEM).

Перевага SPM полягає в цифровому форматі даних, що дозволяє одержувати тривимірні зображення та робити кількісні виміри, фіксуючи латеральні і вертикальні розміри структури, визначати шорсткість, що є важливими характеристиками тонких плівок, які використовуються у фотовольтаїці.

Похибка AFM і STM методів залежить від кривизни зонда та кривизни досліджуваної поверхні. Для мінімізації похибки зонд повинен мати невеликий кут розхилу конуса і радіуса закруглення вістря. Промислові зонди мають радіуси кривизни від 2 до 200 нм залежно від SPM режиму.

В останні роки розроблено понад сорок методик, заснованих здебільшого на AFM, що дозволяють досліджувати різні параметри й властивості нанорозмірних структур. Зокрема, методика латеральних сил у контактному режимі, дозволяє розрізняти елементи в композитному матеріалі із гладкою поверхнею. Це відбувається за рахунок реєстрації зміни величини скручування консолі для різних матеріалів через різні поверхневі властивості досліджуваних структур. Ділянки, де тертя зонд-зразок більше, дають більший поворот зонда і більш високий контраст зображення. Твердість визначається вдавненням зонда в поверхню. В електростатичній силовій мікроскопії [10] використовується різниця потенціалів між зондом і зразком для вивчення електричних властивостей поверхні зразка. Використовуючи зворотний зв'язок по струму для керування напругою, проводять кількісні виміри потенціалу поверхні. Такий метод називається силовою мікроскопією з використанням зонда Кельвіна (KPFM).

Сканувальна ємнісна мікроскопія (SCM) [11] заснована на вимірі ємності між зондом і поверхнею. За допомогою цього методу можна проводити кількісні виміри концентрації носіїв заряду [17]. У всіх вищевказаних режимах на результати експерименту впливає топографія зразка.

Рентгенівські методи дослідження. Дифракція рентгенівських променів на кристалі речовини є основним методом визначення його кристалічної структури та фазового складу. Сутність методу заснована на дифракції рентгенівських променів на об'єктах, розміри яких порівнянні з довжиною хвилі падаючого випромінювання. Теорія дифракції рентгенівських променів ґрунтується на рівнянні Брігга, що описує умову посилення рентгенівських променів, розсіяних на атомних площинах кристала, у результаті їх інтерференції [12]. Величина дифракційного максимуму, задається кутом падіння та довжиною хвилі рентгенівського випромінювання. В якості джерела рентгенівського випромінювання звичайно використовують стандартні рентгенівські трубки.

Метод електронного мікроаналізу. Реєстрація характеристичного рентгенівського випромінювання, збудженого швидкими електронами, лежить в основі електронного мікроаналізу матеріалів [12], використовуваного для якісного та кількісного аналізу елементного складу поверхні СЕ.

Збуджений електронами приповерхній об'єм має розміри порядку мікрона. Електронним пучком можна сканувати по поверхні, отримуючи розподіл елементів. Метод включає використання первинного рентгенівського випромінювання або електронного пучка, який падає на зразок та вибиває електрони внутрішніх оболонок атомів, створюючи вакансії, які можуть бути заповнені із зовнішніх оболонок. Це формує певний спектр рентгенівського випромінювання для кожного з хімічних елементів зразка. Рентгенівське випромінювання, що створюється заповненням електронами вакансій з К-оболонки, називають К-випромінюванням, з L-оболонки - L-випромінюванням. Таким чином, рентгенівські дослідження з використанням стандартних вимірвальних установок і методик [15], дозволяють визначити кристалічну структуру, фазовий склад і товщину досліджуваних плівок СЕ.

Метод сканувальної електронної мікроскопії (SEM). SEM дозволяє досліджувати морфологію поверхні синтезованих плівок СЕ, розміри зерен і, при скануванні поперечного відколу, мікроструктуру різних шарів СЕ [17].

Для проведення SEM електронною гарматою емітується та прискорюється електронний промінь, фокусований рядом збиральних електромагнітних лінз.

При взаємодії лучу з поверхнею зразка генеруються вторинні електрони, які поглинаються в сцинтиляторі з випромінюванням фотонів. Фотони, що реєструються формують зображення. Для проведення SEM-вимірів використовуються сканувальні електронні мікроскопи, які дозволяють одержати мікрофотографії з розрізненням до сотих часток мікрона (Рис. 1).

Метод спектроскопічної еліпсометрії. Розглянемо застосування видимого світла для вивчення тонких плівок СЕ. За допомогою інтерферометрії та рефлектометрії вимірюються малі товщини прозорих тіл по їх кольорам [17].

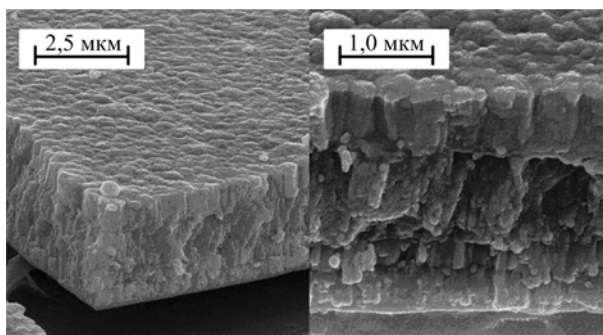


Рис. 1 – SEM-зображення структури поверхні сонячного елемента

Метод виміру товщини тонких плівок із застосуванням поляризованого світла (дві взаємно перпендикулярні p - і s -поляризації), відомий як еліпсометрія. Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття p - і s -поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у якій вимірюється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя. Цей принцип закладений у фундаментальному рівнянні еліпсометрії. Винайдення фотомножних трубок, лазерів, волоконної оптики й швидкодіючих комп'ютерів значно поліпшило повторюваність, гнучкість і швидкість еліпсометричних досліджень. Метод еліпсометрії дозволяє створювати велике різноманіття конфігурацій досліду, що підходять для різного застосування. Методи еліпсометрії з фіксованою довжиною хвилі широко застосовуються в мікроелектронній промисловості. З розвитком мікроелектроніки й програмного забезпечення багатоканальні спектроскопічні еліпсометри.

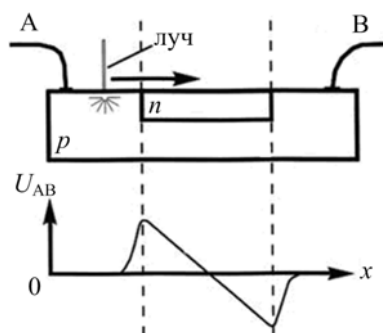


Рис. 2 – Сигнал планарного p - n -переходу

Метод еліпсометрії використовується для виміру комплексного відношення відбиття p - і s -поляризованих променів. У цьому полягає головна відмінність від рефлектометрії, у

якій виміряється відношення інтенсивності відбитого променя до інтенсивності падаючого променя. Цей принцип закладений у фундаментальному рівнянні еліпсометрії.

Метод сканувальної лазерної мікроскопії (LBIC). Якість СЕ істотно залежить від просторової однорідності матеріалу шарів. Наявність неоднорідностей (складу твердого розчину, концентрації носіїв, щільності дефектів і т.д.) приводить до розкиду характеристик і низькому виходу придатних СЕ. Тому просторово-розв'язні методики виміру параметрів напівпровідників необхідні для створення вискоефективних СЕ. Робота сканувального лазерного мікроскопа заснована на появі фото ЕРС при локальному засвіченню просторово-неоднорідного шару напівпровідника [15].

Якщо енергія фотонів перевищує E_g напівпровідника, у плямі засвічення відбувається генерація електрино-діркових пар.

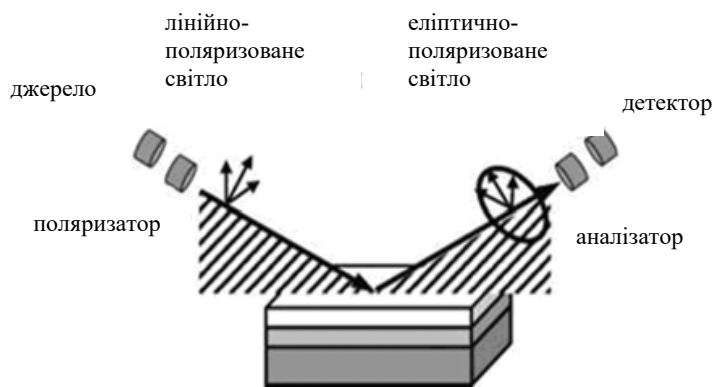


Рис. 3 – Типова еліпсометрична конфігурація, застосовувана для аналізу багатошарових тонкоплівкових структур

Нерівноважні дірки та електрони будуть дифундувати від області засвічення. Тоді на відстані, меншій дифузійної довжини носіїв від області засвічення, існує певна область, що характеризується наявністю убудованого електричного поля. Тоді електрони й дірки просторово розділяються. Перерозподіл заряду викликає порушення радіальної симетрії розподілу нерівноважних носіїв у зразку та, відповідно, перерозподіл заряду за всім зразком. У загальному випадку різниця потенціалів між двома довільними точками на зразку буде відмінна від нуля та визначається напрямком вектора убудованого електричного поля щодо осі, що проходить через точки, у яких виконується вимір, і величиною заряду.

Поводження сигналу, який вимірюється між нерухливими контактами при русі луча через область, що характеризується убудованим електричним полем, пояснимо на прикладі одномірної моделі планарного р-п-переходу (Рис. 2) [16].

Нехай є однорідна п-область в однорідному матеріалі р-типа. При засвіченні зразка ліворуч від п- області електрони, що дійшли до границі переходу, зтягаються його полем усередину п-області. Дірки зустрічають на своєму шляху потенційний бар'єр. Просторово-розділені заряди викличуть появу різниці потенціалів між контактами А і В. У міру наближення до границі переходу кількість носіїв заряду, що дійшли до границі, буде рости й досягне максимуму, коли промінь перебуває на границі р-п-переходу. При засвіченню точно по центру п-області просторовий розподіл електронів і дірок, розділених лівою та правою границями переходу, симетричний, заряди взаємно компенсують один одного і сигнал LBIC дорівнює нулю. У міру наближення до правої границі сигнал починає рости по модулю, але із протилежним знаком. Таким чином, при скануванні променем через планарний р-п-перехід LBIC реєструє двополярний сигнал, нуль якого збігається із центром симетрії переходу. Цей приклад демонструє принцип роботи LBIC.

Метод фотолюмінесценція (PL). PL - швидкий, неруйнуючий метод характеристики електронних властивостей напівпровідників [19], що дозволяє швидко оцінити параметри матеріалу, ідентифікувати домішки й дефекти. Спектроскопія фотолюмінесцентного збудження (PLE) забезпечує інформацію про спектр поглинання в зразках, де неможливі виміри спектрів пропущення [14]. Вичерпні огляди по фотолюмінесценції в напівпровідниках з акцентом на експериментальні результати представлені в [16].

Основні компоненти PL-системи:

- джерело оптичного збудження, звичайне монохроматичне джерело;
- оптична система фокусування збудливого випромінювання на поверхню зразка та заведення PL- випромінювання в спектрометр;
- спектрометр або монохроматор;
- детектор PL-випромінювання (фотоелектронний помножувач, фотодіод або матриця фотодіодів);
- система керування експериментом, збору даних та їх аналізу.

У фотолюмінесценції з розрізненням часу (TRPL) вимірюється інтенсивність (PL), як функція часу. При цьому використовується лазерний імпульс для збудження електронів у напівпровіднику. Інтенсивність (PL) - випромінювання реєструється швидкодіючим детектором, а також може бути виміряна безпосередньо, як функція часу за допомогою фотодіода. Однак щоб одержати більш високе співвідношення сигнал/шум і менший час розрізнення, використовується лічильник одиничних фотонів. За допомогою аналізу PL-випромінювання як функції температури, концентрації вільних носіїв, рівня інжекції, розмірів зразка й т.д., можливо оцінити якість матеріалу й роль різних механізмів рекомбінації в роботі СЕ [15, 16,].

Метод мас-спектрометрії вторинних іонів (SIMS). SIMS - високочутливий метод аналізу поверхні й біля поверхневих ділянок твердих тіл. Цей метод використовується в напівпровідниковій промисловості для вивчення розподілу легуючих домішок і забруднень у мікроелектронних матеріалах і приладах. Основний принцип методу полягає в тому, що багатошарові структури аналізують, розсіюючи їх фокусуванням первинним іонним променем. В емітованих цим процесом вторинних іонів аналізується співвідношення маса/заряд за допомогою мас-спектрометра. На противагу методам спектроскопії маси, які використовуються для загального аналізу, і вимагають розчинення зразка, SIMS дозволяє досліджувати шаруваті структури, включаючи електронні прилади. Особливості, що роблять SIMS привабливим як аналітичний інструмент (чутливість, розрізнення по глибині й т.д.), приводять також до «артефактів», що утрудняють інтерпретацію даних (бокові неоднорідності, топографія поверхні, варіації виходу іонів). Незважаючи на ці труднощі, SIMS часто є єдиним аналітичним інструментом, здатним зондувати малі елементні концентрації в шарах тонких плівок. SIMS дозволяє вивчати всі елементи періодичної таблиці, так само, як і ізотопи. Він чутливий у широкому діапазоні концентрацій - більше восьми порядків величини. Якщо потрібні кількісні результати, то необхідно використати строго погоджені стандарти для кожного досліджуваного сполучення елемент/матриця. Завдяки великому динамічному діапазону SIMS-дані звичайно зображуються на логарифмічній осі. Дані можуть бути представлені як мас-спектрограма або як профіль глибини. Найбільш загальний метод одержання даних аналізу тонких плівок - динамічний SIMS-профіль глибини, у якому мас-спектри досліджують як функцію часу розпилення. Вимірюючи глибину отриманої іонним променем заглибу (кратера) профілометром, можна перетворити час розпилення в глибину.

Метод електронної оже-спектроскопії - ґрунтується на вимірі енергії та інтенсивності струму оже-електронів, емітованих із твердого тіла при оже-ефекті. Якщо в атомі під дією електронного бомбардування або іншим способом створена вакансія на внутрішній

електронній оболонці, збуджений атом через деякий час вертається в основний стан, випускаючи характеристичне електромагнітне випромінювання або здійснює безвипромінювальний оже-перехід. Вакансію на внутрішньому рівні може заповнити електрон, що перебуває на одному із зовнішніх рівнів. У випадку оже-ефекту перехід атома в нормальний стан супроводжується передачею енергії одному з електронів зовнішнього рівня. Цей електрон вилітає з атома з певної, характерною для даного атома кінетичною енергією. По енергетичному спектру оже-електронів можна однозначно визначити елементний склад [17].

В оже-спектроскопії піку оже-електронів привласнюються номери, наприклад, $Si_1 - 92$ eВ; $Si_2 - 1619$ eВ. Для всіх елементів, крім водню та гелію, на яких оже-перехід неможливий, складений атлас спектрів оже-електронів. Якщо атом перебуває у зв'язаному стані, енергія оже-електронів трохи відрізняється від вільного стану або з'являються нові піки. По змінах спектра можна судити про хімічні зв'язки елементів, однак у цей час атлас спектрів є лише для деяких з'єднань.

Порушення атомів проводиться первинним гострофокусованим електронним пучком з енергією електронів $0,1 \div 10$ кеВ. Діаметр пучка $0,1 \div 10$ мкм визначає локальність аналізу в площині об'єкта. Використання електронів для порушення атомів, дозволяє додатково реалізувати режими сканувального електронного мікроскопа (SEM), що практично завжди робиться в сучасних оже-спектрометрах. Зображення об'єкта у вторинних, відбитих або поглинених електронах виводиться на екран дисплея, що дозволяє визначати місце аналізу з розрізненням SEM (10 нм). Локальність по глибині визначається глибиною виходу оже-електронів і становить $0,3 \div 3,0$ нм залежно від енергії оже-електронів, що перебуває в межах 20-2500 eВ. Низька енергія аналізованих електронів і висока чутливість до поверхневих забруднень вимагає проведення вимірів у надвисокому вакуумі порядку 10^{-10} мм рт. ст. Оже-спектри реєструються дисперсійними енергоаналізаторами в режимах $N(E)$ - розподілу вторинних електронів по енергіях і $d(E)/d$ - диференційованих спектрів. Розподіл елементів по глибині (Рис. 4) одержують шляхом іонного розпилення досліджуваної плівки з періодичною реєстрацією оже-електронів.

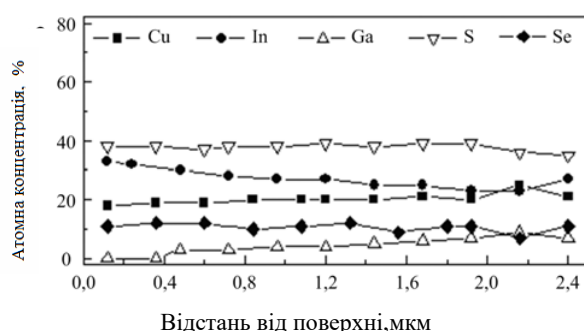


Рис. 4 – Розподіл по товщині плівки компонентів твердого розчину $Cu(In,Ga)(S,Se)_2$

Для оцінки контактного опору між напівпровідником і металевим контактом використовується спеціальна величина, називана специфічним контактним опором ρ_c , величина якого визначається (рис. 5) відповідно до співвідношення (1)

$$\rho_c = R_s \cdot L_T, \quad (1)$$

де L_T – довжина переносу (трансферна довжина) – відстань від контакту, на якому величина напруги послабляється в e раз.

Тоді (R_S), можна визначити 4-зондовим методом, (U) і (I) визначаються експериментально (Рис. 5).

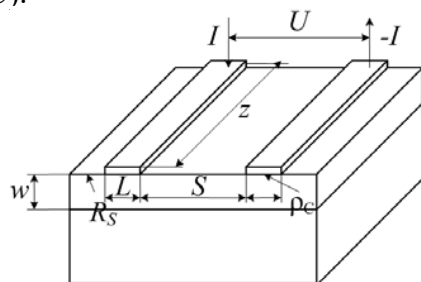


Рис. 5 – Схема вимірювання специфічного контактного опору

Вимір питомого й поверхневого опору 4-зондовим методом. Для визначення питомого (ρ) і поверхневого (R_S) опору отриманих плівок зручно використати 4-зондовий метод виміру, не потребуючого створення омичного контакту до досліджуваного зразка. Основна умова - плоска поверхня зразка, лінійні розміри якої перевершують лінійні розміри системи зондів [20] (Рис. 6).

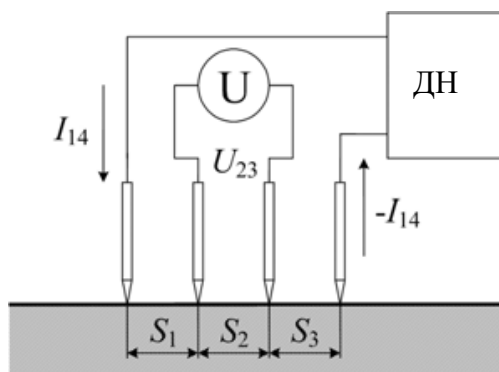


Рис. 6 – Електрична схема вимірювання питомого та поверхневого опору 4-зондовим методом: ДН - джерело постійної напруги; U - вольтметр

Для усунення недоліків розглянутих методів дослідження напівпровідникових структур, запропоновано, як перспективний метод дослідження структурних властивостей поверхні рельєфу напівпровідникової кулі СЕ, використати обчислювальний метод фрактальної геометрії [22], що дозволить враховувати фрактальні властивості структури напівпровідникової кулі та тим самим розрахувати реальні величини вихідної потужності та ККД, підвищити від 3 до 5% стабільність та точність ВАХ та ВВХ ФЕП. Структурна геометрична (фізична) модель сприймаючої поверхні сонячного ФЕП, показана на Рис.7.

Для розрахунку площі реальної сприймаючої поверхні рельєфу сонячного елемента, запропоновано використати вираз (2):

$$S_{REAL} = S_G - (\Delta S_{MT} + \Delta S_{MP} + \Delta S_{MMT} + \Delta S_{LN}) \quad (2)$$

де S_{REAL} - реальна площа сприймаючої поверхні ФЕП з пошкоджуючими дефектами; S_G - геометрична площа топологічної поверхні ФЕП; ΔS_{MT} - геометричне збільшення локальної

площі макротріщини; ΔS_{MMT} - геометричне збільшення локальної площі мікротріщини; ΔS_{MP} - геометричне збільшення локальної площі мікропори; ΔS_{LN} - геометричне збільшення локальної площі неоднорідності.

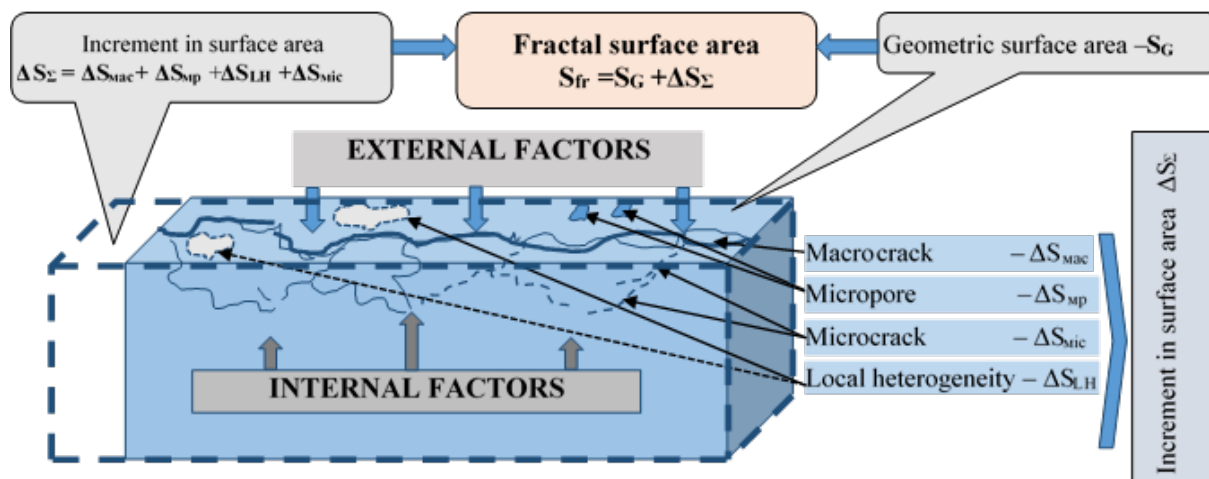


Рис. 7 – Структурна геометрична модель сприймаючої поверхні сонячного ФЕП

Висновки

Розглянуті та проаналізовані основні вимоги до моделей тонкоплівкових сонячних елементів, для поліпшення стабільності та точності ВАХ і ВВХ фотоелектричних перетворювачів. Показано, що існуючі моделі СЕ, дозволяють розрахувати вихідну потужність і ККД, на основі врахування співвідношення між такими параметрами як: номінальної та максимальної потужності; напругою холостого ходу та номінальною напругою; струмом короткого замикання та номінальним струмом.

Виявлено, що в аналітичних вирази моделей СЕ, вводяться обмеження та допущення про ідеально гладкі поверхні, тобто без поверхневих дефектів, що може викликати похибки та відхилення при розрахунку реальних вихідних параметрів СЕ. Показано, що точкові дефекти в структурі тонкоплівкових сонячних елементах, впливають на показники поглинання оптичного випромінювання через зміну реальної площі сприймаючої поверхні рельєфу напівпровідникового шару фотоелектричного перетворювача.

Визначено, що при виготовленні сонячних елементів, важливо оцінити якість кожного з його шарів на етапі нанесення для того, щоб реально представляти їх кристалічну структуру, хімічний склад, оптичні та електричні властивості. Відзначено, що при тривалій експлуатації сонячних панелей та сонячних батарей, відбувається значне зниження їх продуктивності, через погіршення основних параметрів: коефіцієнта корисної дії та вихідної потужності.

Проведено дослідження фізичних процесів у структурі напівпровідникового шару сонячного елемента, а також вивчення фізичних властивостей тонких плівок для сонячного елемента, на основі наступних методів дослідження: сканувальна зондова (ємнісна) та тунельна мікроскопія (спектроскопія); атомна силова мікроскопія; рентгеноскопія; електронний мікроаналіз; сканувальна електронна мікроскопія; еліпсометрія; спектроскопічна еліпсометрія; електронна оже-спектроскопія; мас-спектрометрія вторинних іонів; фотолюмінісценція; сканувальна лазерна мікроскопія, однак показано, що жоден метод діагностики, не здатний відтворити вплив структурно-фазового стану структури напівпровідникового шару на параметри СЕ, при наявності пошкоджувальних дефектів на сприймаючій поверхні фотоелектричного перетворювача.

Запропоновано, як перспективний метод дослідження структурних властивостей напівпровідникового шару, використати обчислювальний метод фрактальної геометрії, що дозволить враховувати фрактальні властивості структури напівпровідникового шару та тим самим розрахувати реальні величини вихідної потужності та ККД СЕ.

Список використаних джерел:

1. Nguyen X. H. Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink / X. H. Nguyen, M. P. Nguyen // *Environmental Systems Research*. – 2015. – Vol. 4 (24). – P. 7–22.
2. Method for short-term photovoltaic generation power prediction base on weather patterns / Z. Wang, L. He, X. Cheng, J. He // *IEEE China International Conference on Electricity Distribution*. – 2014. – P. 213–215.
3. Novel sevel parameter model for photovoltaic modules / A. Adel, H. Elbaset, M. Ali, S. Abd-El // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. – 2014. – Vol. 130. – P. 442–455.
4. De Giorgi M. Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data / M. De Giorgi, P. Congedo, M. Malvoni // *IET Science, Measurement & Technology*. – 2014. – Vol. 8 (3). – P. 90–97.
5. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters / P. Budanov [et al.] // *Eastern-Europoian Journal of Enterprise Thechnologies*. – 2018. – № 5/5 (95). – P. 20–28.
6. A New Generation of Standard Solar Models / N. Vinyoles [et al.] // *The Astrophysical Journal*. – 2017. – Vol. 835, № 2. – P. 1–16.
7. Cotfas D. T. Methods to determine the DC parameters of solar cells: A critical review / D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, S. Kaplanis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 28. – P. 588–596.
8. Evaluation of methods to extract parameters from current–voltage characteristics of solar cells / Y. Li [et al.] // *Solar Energy*. – 2013. – Vol. 90. – P. 51–57.
9. Laudani A. High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I–V curves by using reduced forms / A. Laudani, F. Riganti Fulginei, A. Salvini // *Solar Energy*. – 2014. – Vol. 103. – P. 316–326.
10. Lineykin S. An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel / S. Lineykin, M. Averbukh, A. Kuperman // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 30. – P. 282–289.
11. Cubas J. On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior / J. Cubas, S. Pindado, M. Victoria // *Power Sources*. – 2014. – Vol. 247. – P. 467–474.
12. A new method for determining the characteristics of solar cells / L. Peng [et al.] // *Power Sources*. – 2013. – Vol. 227. – P. 131–136.
13. Cubas J. Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function / J. Cubas, S. Pindado, C. Manuel // *Energies*. – 2014. – Vol. 7. – P. 4098–4115.
14. Patil Sahebrao N. Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model / N. Patil Sahebrao, R. C. Prasad // *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 2, iss. 1. – P. 37–40.
15. Cucchiela F. A profitability assessment of small-scale photovoltaic systems in an electricity market without subsidies / F. Cucchiela, I. D'Adamo, M. Gastaldi // *Energy Conversion and Management*. – 2016. – № 129. – P. 62–74.
16. Villala M. G. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays / M. G. Villala, J. R. Gazoli, E. R. Filho // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 24, iss. 5. – P. 1198–1208.
17. Stanly L. S. Grid connected solar photovoltaic system with Shunt Active Filtering capability under transient load conditions / L. S. Stanly, R. Divya, M. G. // *IEEE International Conference on Advancements in Power and Energy*. – 2015. – P. 345–350.
18. Levshov A. V. Mathematical modeling of photovoltaic solar cells / A. V. Levshov, A. Yu. Fedorov, A. V. Molodichenko // *Science practices of DonNTU. Series: "Electrical engineering and energy"*. – 2011. – № 11 (186). – P. 246–249.
19. A new strategy for improved spectral performance in solar power plants / A.G. Imenes [et al.] // *Solar Energy*. – 2006. – Vol. 80, № 10. – P. 1263–1269.
20. Roedem B. Thin-film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / B. Roedem // *Refocus*. – 2006. – Vol. 7, № 4. – P. 34–39.
21. Mints P. PV – the story so far how is the PV industry progressing in its bid to be considered mainstream? / P. Mints // *Refocus*. – 2006. – Vol. 7, № 6. – P. 34–36.
22. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / P. Budanov [et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 3, № 8. – P. 75–80.

References:

1. Nguyen, XH & Nguyen, MP 2015, 'Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in MATLAB/Simulink', *Environmental Systems Research*, vol. 4 (24), pp. 7-22.
2. Wang, Z, He, L, Cheng, X & He, J 2014, 'Method for short-term photovoltaic generation power prediction base on weather patterns', *IEEE China International Conference on Electricity Distribution*, pp. 213-215.
3. Adel, A, Elbaset, H, Ali, M & Abd-El, S 2014, 'Novel sevel parameter model for photovoltaic modules', *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 130, pp. 442-455.
4. De Giorgi, M, Congedo, P & Malvoni, M 2014, 'Photovoltaic power forecasting using statistical methods: impact of weather data', *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 8 (3), pp. 90-97.
5. Budanov, P, Brovko, K, Cherniuk, A, Pantelieieva, I, Oliynyk, Yu, Shmatko, N & Vasyuchenko, P 2018, 'Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters', *Eastern-Eruopian Journal of Enterprise Thechnologies*, no. 5/5 (95), pp. 20-28.
6. Vinyoles, N, Serenelli, AM, Francesco, LV, Basu, S, Bergström, J, Gonzalez-Garcia, MC, Maltoni, M, Peña-Garay, C & Song, N 2017, 'A New Generation of Standard Solar Models', *The Astrophysical Journal*, vol. 835, no. 2, pp. 1-16.
7. Cotfas, DT, Cotfas, PA & Kaplanis, S 2013, 'Methods to determine the DC parameters of solar cells: A critical review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 588-596.
8. Li, Y, Huang, W, Huang, H, Hewitt, C, Chen, Y, Fang, G & Carroll, DL 2013, 'Evaluation of methods to extract parameters from current-voltage characteristics of solar cells', *Solar Energy*, vol. 90, pp. 51-57.
9. Laudani, A, Riganti Fulginei, F & Salvini, A 2014, 'High performing extraction procedure for the one-diode model of a photovoltaic panel from experimental I-V curves by using reduced forms', *Solar Energy*, vol. 103, pp. 316-326.
10. Lineykin, S, Averbukh, M & Kuperman, A 2014, 'An improved approach to extract the single-diode equivalent circuit parameters of a photovoltaic cell/panel', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 282-289.
11. Cubas, J, Pindado, S & Victoria, M 2014, 'On the analytical approach for modeling photovoltaic systems behavior', *Power Sources*, vol. 247, pp. 467-474.
12. Peng, L, Sun, Y, Meng, Z, Wang, Y & Xu, Y 2013, 'A new method for determining the characteristics of solar cells', *Power Sources*, vol. 227, pp. 131-136.
13. Cubas, J, Pindado, S & Manuel, C 2014, 'Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function', *Energies*, vol. 7, pp. 4098-4115.
14. Patil Sahebrao, N & Prasad, RC 2014, 'Design and simulation of MPPT algorithm for solar energy system using Simulink model', *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, iss. 1, pp. 37-40.
15. Cucchiola, F, D'Adamo, I & Gastaldi, M 2016, 'A profitability assessment of small-scale photovoltaic systems in an electricity market without subsidies', *Energy Conversion and Management*, no. 129, pp. 62-74.
16. Villala, MG, Gazoli, JR & Filho, ER 2009, 'Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays', *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, iss. 5, pp. 1198-1208.
17. Stanly, LS, Divya, R & Nair, MG 2015, 'Grid connected solar photovoltaic system with Shunt Active Filtering capability under transient load conditions', *IEEE International Conference on Advancements in Power and Energy*, pp. 345-350.
18. Levshov, AV, Fedorov, AYU & Molodichenko, AV 2011, 'Mathematical modeling of photovoltaic solar cells', *Science practices of Donetsk National Technical University, series electrical engineering and energy*, no. 11 (186), pp. 246-249.
19. Imenes, AG et al. 2006, 'A new strategy for improved spectral performance in solar power plants', *Solar Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1263-1269.
20. Roedem, B 2006, 'Thin-film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs', *Refocus*, vol. 7, no. 4, pp. 34-39.
21. Mints, P 2006, 'PV – the story so far how is the PV industry progressing in its bid to be considered mainstream?', *Refocus*, vol. 7, no. 6, pp. 34-36.
22. Budanov, P, Kyrsov, I, Brovko, K, Rudenko, D, Vasiuchenko, P & Nosyk, A 2021, 'Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 8, pp. 75-80.

Стаття надійшла до редакції 05 листопада 2022 року

ДО УВАГИ АВТОРІВ

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

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

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

Публікаційна етика та правила оформлення наукових публікацій

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

Опубліковані в Збірнику наукових праць УІПА 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://slovnuk.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 29. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2022. – 124 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 29. – Kharkiv, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy (UEPA), 2022. – 124 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 22.11.2022, 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.