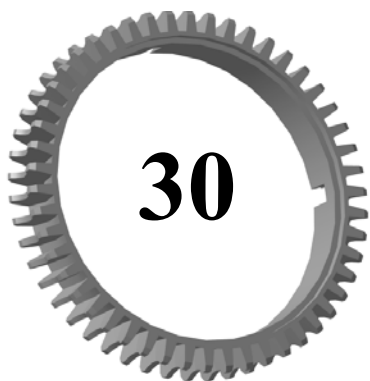




Прикладна механіка
Матеріалознавство
Галузеве машинобудування
Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка

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

ISSN 2079 – 1747
DOI 10.32820/2079-1747-2022-30

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.

Тріщ 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

Подоляк 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, № 30

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 10.32820/2079-1747-2022-30

Мови видання:

українська, англійська

Друкується за рішенням Вченої ради УІПА,
протокол № 6 від 21.02.2023 р.

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

Журнал відображено у базах даних:

Національна бібліотека України імені

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

Bielefeld Academic Search Engine –

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

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

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

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

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

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

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>Галузеве машинобудування</u>	5
Fidrovskа N., Slepuzhnikov E., Nesterenko V., Korovko A. The stability of rope drum	5
Олєйнікова О.М., Шевченко В.О., Бондаренко Д.В. Методи утримання землерийно-транспортної машини на запланованій траєкторії руху	10
Кириченко І.Г., Мусаєв З.Р., Вороновський Д.В. Комп'ютерне моделювання фронтальних навантажувачів	22
Резніченко О.І., Рубашка В.П. Побудова розрахункової схеми аналізу стійкості розбірних палетних стелажів	29
Супонєв В. М., Рагулін В. М., Розенфельд М. В. Визначення конструктивних параметрів та опору переміщення в ґрунті робочого обладнання ножового трубозаглиблювача	42
<u>Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.....</u>	51
Чеботарьов А.М., Бондаренко Ю.О. Підвищення рівня використання інформації в системах технічної діагностики конденсаторів парових турбін.....	51
Грінченко Г.С., Ковтун О.А., Миколайко В.В., Нестеренко Р.О., Антоненко Н.С. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: європейський зелений курс.....	61
Буданов П.Ф., Бойко Т.Г., Грінченко Г.С., Нечуйвітер О.П., Цихановська І.В. Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів	73
До уваги авторів.....	85

THE STABILITY OF THE ROPE DRUM

© N. Fidrovska¹, E. Slepuzhnikov², V. Nesterenko³, A. Korovko¹

Харківський національний автомобільно-дорожній університет¹, National University of Civil Protection of Ukraine², Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова³

Інформація про авторів:

Фідровська Наталія Миколаївна: ORCID: [0000-0002-5248-273X](https://orcid.org/0000-0002-5248-273X); nfidrovskaya@ukr.net: доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

Слепузніков Євген Дмитрович: ORCID: [0000-0002-5449-3512](https://orcid.org/0000-0002-5449-3512); slepuzhnikov@nuczu.edu.ua; кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри спеціальної хімії та хімічної технології, Національний університет цивільного захисту України вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023.

Нестеренко Вікторія Володимирівна: ORCID: [0000-0002-5570-3059](https://orcid.org/0000-0002-5570-3059); vik6462@ukr.net: кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри енергомашинобудування, Первомайська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, вул. Одеська, 107а, м. Первомайськ, Україна, 55201.

Коровко Андрій Володимирович: korovko1996@gmail.com, аспірант Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002

The stability problems of rope drums are quite relevant. The rope drum is a thin-walled shell in most cases, which under the influence of external pressure created by the rope can lead to loss of stability. The issues of stability for the drum shell, which is loaded with turns of the rope, are very important, because they are directly related to the safety and reliability of the rope hoist.

The studies made it possible to obtain a new methodology for calculating cylindrical shells for stability, which takes into account not only the length of the shell, but also the rigid connection with the front lip. In addition, a calculation formula was obtained for determining the critical pressure of the oval shell, which bears much similarity to the experiments of American scientists.

The paper also examines the effect of thickness variation on the critical load of the drum is also examined. The conducted studies allow concluding that the parameters of the rope drums completely eliminate the need to install rings and stiffeners. Also, as a result of the study, it was found that the shell of the crane drum under the influence of radial load cannot lose stability. Findings show that in all cases, the gain margin of the shell for the cable drum is greater than the strength.

Keywords: rope drum, shell stability, critical pressure, maximum load, stiffeners.

Фідровська Н.М. Слепузніков Є.Д., Нестеренко В.В., Коровко А.В. «Стійкість канатних барабанів».

Проблеми стійкості канатних барабанів являються досить актуальними. Канатний барабан являється в більшості випадків тонкостінною оболонкою, яка під дією зовнішнього тиску, який створюється канатом, може привести до втрати стійкості. Питання стійкості обичайки барабана, який, навантажений витками канату являються дуже важливими, тому що з ними пов'язана безпосередньо безпека і надійність канатного підйому.

Провенеді дослідження циліндричних оболонок дозволили отримати нову методику розрахунків на стійкість, яка враховує не тільки довжину оболонки, але і жорсткість з'єднання з лобовинами. Крім цього, було отримано розрахункову формулу для визначення критичного тиску овальної оболонки, яка дає досить добре співпадання з експериментами американських вчених.

В роботі також було розглянуто вплив різностінності на критичне навантаження барабану. Провенеді дослідження дозволили зробити висновок про те, що параметри канатних

барабанів дозволяють повністю виключити необхідність встановлення кілець і ребер жорсткості. Також в результаті дослідження було встановлено, що обичайка кранового барабану під впливом радіального навантаження не може втратити стійкості. Дослідження показали, що у всіх випадках запас стійкості обичайки канатного барабану більший, ніж на міцність.

Ключові слова: канатний барабан, стійкість обичайки, критичний тиск, критичне навантаження, ребра жорсткості.

Introduction

The reliability of the cable lift depends mainly on the strength and stability of the rope drum. If the thickness of the shell obtained by the calculation for the strength is not provided, then either its thickness must increase or there is a need to install the elements of rigidity. The first way leads to an increase in the metal content of the drum, and the second one also complicates the manufacturing technology. To ensure the stability of the rope drum shell, reinforcement elements - rings or longitudinal stiffeners - are used, although this design has several disadvantages.

During the operation of the lifting devices, there are some cases of cable drums destruction. But the reason for this a tense state was always which did not threaten the loss of stability of the shell, but which led to the destruction of the fatiguing nature. The complexity of the drum manufacturing technology cannot be justified and, on the contrary, it is necessary to release the construction from the unnecessary elements in terms of stability. Therefore, reducing the metal content of the rope drum shell and ensuring its reliable operation is a very urgent task for modern craning.

Literary data analysis and problem statement

In work [1], the tension state of shells and diaphragms of mine lifting machines is considered on the example of mine lifting machine SHPM BCC 8 / 5x2,7, which is intended for operation at depths up to 1200 meters. It has been observed that cracks appear in the welded joints and breaks. Crack repair was performed by removing the welded metal and re-welding.

In work [2] the studies results of rope drums having rigidity rings are given. It has been shown that the rope drums accept cyclic loads and local peak tensions, especially at weld joints. This is the cause of the appearance and development of fatiguing joints. A program for calculating the tension-strain state of the shell without reinforcing elements and with rings of rigidity is made. The stability issues of the rope drum custom were not observed in the article.

In work [3], an empirical method for creating a parametric model of a mine lifting drum was developed. Drum stability issues were not observed.

In work [4], a numerical simulation of the lifting mechanism dynamics in a cable crane was developed. Drum stability issues were not observed.

In work [5], a simulation of the lifting mechanism was carried out. The four mass dynamic model was applied. Based on the choice of the nature change in the acceleration of the mechanism of lifting the load is eliminated dynamic loads in the rope during the established movement. Drum stability issues were not observed.

In work [6], a mathematical model for lifting a crane load was developed. The result is a graphical dependence of the effort change in the elements of the crane when changing individual parameters of the system. Drum stability issues were not observed.

In work [7] The dynamic models of the lifting mechanism with distributed parameters, which were described by differential equations in partial derivatives are applied. Drum stability issues were not observed.

All this suggests that a study of the rope drum stability is necessary.

Therefore, our study focuses on the theory of the stability of the drum shell to identify noticeable reserves and the possibility of using more rigid, more technological and in many cases less metal drums.

Purpose and objectives of research

The purpose of the study is to determine the methodology for calculating rope drums when designing hoisting machines.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- to conduct research of a rope drum under the influence of external load;
- to determine the parameters and their influence on the critical load of the cable drum;
- to develop a new methodology for calculating the stability of the rope drum.

Calculation of the cable drum stability

The loss of drum flange stability, which is loaded with coils of rope, can lead to an accident, significant losses on repair work. Therefore, in the design of rope drums in most cases, the calculation of the stability of the shell is conducted.

The critical tension can not exceed $0,8 \sigma_t$ for steel drums and it is not more than $0,6 \sigma_b$ for cast iron. If the actual margin of resistance is less than the recommended one then it is offered, either to increase the thickness of the shell, or to install the elements of rigidity (stiffeners).

In the study materials, when calculating the stability margin of stability of the cylindrical flange of drum is considered that:

$$n = \frac{\sigma_{kp}}{\phi \cdot \sigma_{cr}} \geq [n], \quad (1)$$

where $[n]$ is the recommended safety margin,

$[n] = 1,7$ - for steel drums,

$[n] = 2$ for cast iron drums.

σ_{cr} is the critical tension in a cylindrical flange by Papkovich formula

$$\sigma_{kp} = 0.92 \cdot E_b \cdot \frac{\delta}{l} \cdot \sqrt{\frac{2\delta}{D_b}}, \quad (2)$$

The influence coefficient of the deformation flange of drum and rope is calculated by the formula:

$$\phi = \left(1 + \frac{E_k \cdot F_k}{E_b \cdot \delta \cdot t} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

where E_k is the elastic modulus for the steel rope,

F_k is the cross-sectional area of all rope wires.

The analysis of the solutions used in the theory of stability showed that for the parameters of the crane drums the values of the stability factor of the shell are overestimated.

In Fig. 1 the parameters of the real drums and the results of the calculations are given.

The curve a corresponds to dependencies (1). The curve b – Papkovich's dependencies (2).

Taking into account the influence of the elastic connection of the front with the shell, the calculation should be made by (6).

For $\delta = \delta l$ and $r / R = 1/2$ we obtain the curve b.

A method of variational calculus was used to estimate ϕ using the Euler equation of the mixed variational task in the development by S.M. Kan [8]

To calculate the elasticity of fixation of edges of cylinder of drum with frontal surfaces there is used coefficient θ

$$\theta = \pi^4 \sqrt{\frac{\psi_0^2 + 0,9\psi_0 + 1,5}{\psi_0^2 + 0,9\psi_0 + 0,21}}, \quad (4)$$

where

$$\phi_0 = 2.6 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{R}{\delta}} \left(\frac{\delta}{\delta_a} \right)^3, \quad C = \frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 + \nu + (1 - \nu) \cdot \frac{r^2}{R^2}}, \quad (5)$$

where δ_l is the thickness of the front flange,

r is the radius of the front,

ν is the Poisson's coefficient.

The dependence of the coefficient θ from the parameters of the drum is shown in Fig. 2.

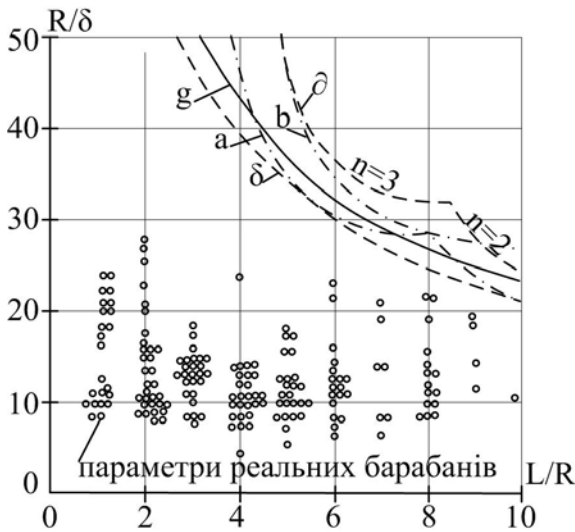


Fig. 1 – Parameters of cable drums

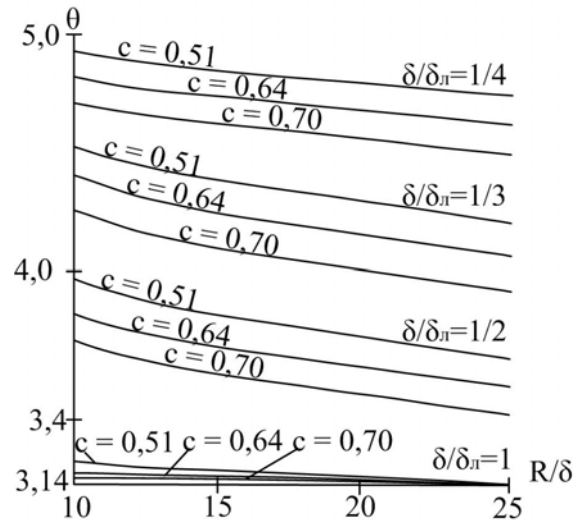


Fig. 2 – The dependence of the coefficient θ from the parameters of the drum

The critical pressure for the rope drum shell can be determined from the formula:

$$p = \frac{D(n^2 - 1)}{R^3} \left[1 + \frac{\theta^4 R^6 E \delta}{DL^4 n^4 (n^2 - 1)} \right], \quad (6)$$

where D is the cylindrical rigidity of the drum

$$D = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}. \quad (7)$$

The case where the cylindrical shell is not fully loaded but only a section with width V is very interesting and also needs research. The calculated formula for critical pressure was obtained [9]:

$$p_{kp} = \frac{\frac{D \cdot (n^2 - 1)}{R^3} \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^4 \cdot \frac{R^6 \cdot E \cdot \delta}{D \cdot n^4 \cdot (n^2 - 1)^2} \right]}{\frac{b}{L} - \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\sin \frac{\pi \cdot (L + b)}{L} - \sin \frac{\pi \cdot (L - b)}{L} \right]}, \quad (8)$$

The experiments made it possible to make a comparative characteristic of fig. 6.

Initial deviations from the geometric shape of the shell reduce its stability. A formula was obtained for the critical pressure of an elliptical shell [9]:

$$p_{kp} = \frac{1}{2k-1} \cdot \left[\frac{64 \cdot D \cdot (n^2-1)}{b^3 \cdot \sqrt{(7k^2+2k+7)^3}} + \left(\frac{\theta}{L} \right)^4 \cdot \frac{E \cdot \delta \cdot b^3 \cdot \sqrt{(7k^2+2k+7)^3}}{64 \cdot n^4 \cdot (n^2-1)} \right], \quad (9)$$

where $k = a / b$, a and b are the semi axis of the ellipse.

Conclusions

1. The studies have shown that the flange of the rope drum under the influence of external load, which occurs when winding the rope, with those ratios of radius and length of the drum and the thickness of the flange of the drum can not lose stability.

2. The obtained engineering technique for calculating the cable rope shell made it possible to conclude that, in all cases, the requirements for the local resistance of the shell are greater than for strength, that is, the stability does not cause flange thickening.

3. As we can see, the influence of ellipticity on the critical pressure in the area is possible for crane drums ($b / a \geq 0,95$) it does not exceed 14% according to [9] and 8% according to (30). The elastic connection of the front and the flange of drum significantly increases the critical load. The initial possible ovality of the drum shell does not significantly affect the critical load.

References

1. Маневич А. И. Напряженное состояние оболочек и диафрагм шахтных подъемных машин / А. И. Маневич, А. И. Бичуч // *Підйомно-транспортна техніка*. – 2003. – № 1. – С. 3–16.
2. Нестеренко В. В. К оценке прочности стенки канатного барабана с подкрепляющими кольцами жесткости / В. В. Нестеренко, Н. Н. Фидровская // *Підйомно-транспортна техніка*. – 2009. – № 4. – С. 112–117.
3. Zabolotny K. S. Semiempirical method of creation of generalized parameter-oriented model of mine hoist drum shell / K. S. Zabolotny, M. A. Rutkovskiy // *Scientific bulletin of University National Mountain*. – 2012. – Iss. 4. – P. 88–92.
4. Analysis of various approaches to modeling of dynamics of lifting-ransport vehicles. / O. Grigorov [et al.] // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, no. 4.3 (Special Iss. 3). – P. 64–70.
5. Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane / H. Pu [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2011. – № 16. – P. 586–593.
6. Grabski J. Dynamic analysis of the load hoisting process / J. Grabski, J. Strzalko // *Journal of theoretical and applied mechanics*. – 2003. – № 4. – P. 853–872.
7. Dynamic Analysis of the load lifting. / J. Vlacic [et al.] // *Journal of mechanical engineering*. – 2008. – № 10. – P. 655–661.
8. Кан С. Н. Строительная механика оболочек / С. Н. Кан. – М.: Машиностроение, 1966. – 508 с.
9. Фідровська Н. М. Канатні барабани: монографія / Н. Н. Фідровська. – Харків: НІМІ, 2012. – 195 с.

References

1. Manevich, AI & Bichuch, AI 2003, 'Napryazhennoye sostoyaniye obolochek i diafragm shakhtnykh podzemnykh mashin' [The tension state of shells and diaphragms in mine lifting machines], *Pidymno-transport equipment* [Lifting and transport technics], no. 1, pp. 3-16.
2. Nesterenko, VV & Fidrovskaya, NN 2009, 'K otsenke prochnosti stenki kanatnogo barabana s podkreplyayushchimi koltsami zhestkosti' [To evaluate the strength of the rope drum flange with the stiffeners], *Pidymno-transport equipment* [Lifting and transport technics], no. 4, pp. 112-117.
3. Zabolotny, KS & Rutkovskiy, MA 2012, 'Semiempirical method of creation of generalized parameter-oriented model of mine hoist drum shell', *Scientific bulletin of University National Mountain*, iss. 4, pp. 88-92.
4. Grigorov, O, Druzhynin, E, Anishchenko, G, Strizhak, M & Strizhak, V 2018, 'Analysis of various approaches to modeling of dynamics of lifting-ransport vehicles', *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 4.3, pp. 64-70.
5. Pu, H, Xie, X, Liang, G, Yun, X & Pan, H 2011, 'Analysis for dynamic characteristics in load-lifting system of the crane', *Procedia Engineering*, no. 16, pp. 586-593.
6. Grabski, J & Strzalko, J 2003, 'Dynamic analysis of the load hoisting process', *Journal of theoretical and applied mechanics*, no. 4, pp. 853-872.
7. Vlacic, J, Malesev, P, Sostakov, R & Brkljac, N 2008, 'Dynamic Analysis of the load lifting', *Journal of mechanical engineering*, no. 10, pp. 655-661.
8. Kan, CN 1966, *Stroitel'naya mekhanika obolochek*, Machinostroenie, Moskva.
9. Fidrovskaya, NM 2012, *Kanatni barabany*, NIMI, Kharkiv.

Стаття надійшла до редакції 16 січня 2023 року

МЕТОДИ УТРИМАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНО-ТРАНСПОРТНОЇ МАШИНИ НА ЗАПЛАНОВАНИЙ ТРАЕКТОРІЇ РУХУ

© Олейнікова О.М., Шевченко В.О., Бондаренко Д.В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Інформація про авторів:

Олейнікова Олександра Михайлівна: ORCID 0000-0002-5373-9680; olexandrachaplygina@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент, доцент каф. будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вулиця Ярослава Мудрого, 25, Харків, Харківська область, 61002, Україна.

Шевченко Валерій Олександрович: ORCID 0000-0001-8707-1837; valery03102016@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент, доцент каф. будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вулиця Ярослава Мудрого, 25, Харків, Харківська область, 61002, Україна.

Бондаренко Дмитро Володимирович: ORCID 0000-0001-9092-7894; dbndrnk@gmail.com; аспірант каф. будівельних і дорожніх машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вулиця Ярослава Мудрого, 25, Харків, Харківська область, 61002, Україна.

Одним із перспективних напрямів удосконалення землерийної техніки, зокрема землерийно-транспортних (ЗТМ) та навантажувальних (НМ) машин, є підвищення їх курсової стійкості під час руху по запланованій траєкторії.

Наслідками сходу ЗТМ з траєкторії руху можуть стати: зниження продуктивності машини, зростання собівартості виконуваних робіт, поява аварійних ситуацій.

Відхилення реальної траєкторії руху від запланованої відбувається внаслідок появи додаткових збурюючих зусиль як у транспортному режимі руху ЗТМ та НМ, так і під час виконання технологічних операцій.

Виконаний огляд науково-технічної літератури дозволив визначити основні методи забезпечення курсової стійкості ЗТМ та НМ. До цих методів слід віднести:

- автоматизоване керування положенням машини та її робочого обладнання за допомогою зовнішніх систем стеження;
- автоматизоване керування положенням машини та її робочого обладнання на підставі інформації, отриманої від датчиків, встановлених на самій ЗТМ;
- введення до конструкції ЗТМ та НМ додаткових пристосувань, які змінюють параметри самої машини, параметри навантаження робочого обладнання, параметри навколишнього середовища та ін.

На підставі аналізу конструкцій сучасних ЗТМ та НМ, а також патентного пошуку визначені та класифіковані основні напрями вдосконалення машин з метою покращення показників курсової стійкості. Основними сучасними напрямками підвищення показників курсової стійкості ЗТМ та НМ є використання наступних конструктивних засобів: супутникові системи, системи лазерного наведення, системи контролю положення за зовнішнім копіром, системи зміни кута повороту керованих коліс у горизонтальній площині, системи зміни кута повороту коліс у вертикальній площині, системи зміни положення центра ваги ЗТМ та НМ, системи підвищення коефіцієнта зчеплення, системи зменшення збурюючих зусиль, системи компенсування збурюючих зусиль додатковими робочими зусиллями.

Проведений аналіз дозволив розробити декілька конструктивних пропозицій щодо утримання машини на запланованій траєкторії руху. Порівняння витрат на використання визначених методів утримання машини на запланованій траєкторії руху показав, що

найбільш дешевим є використання додаткових пристосувань, які дозволяють змінювати параметри самої ЗТМ та НМ.

Ключові слова: землерийно-транспортна машина, курсова стійкість, траєкторія руху, метод утримання, конструктивна пропозиція.

Olieinskova O., Shevchenko V., Bondarenko D. “Methods of keeping an earth-moving machine on the planned trajectory of movement”.

One of the promising areas of improvement of earth-moving machinery, in particular earth-moving machines and loading machines, is to increase their road-holding ability during movement along the planned trajectory.

Consequences of the departure of earth-moving machines from the trajectory of movement can be: a decrease in the productivity of the machine, an increase in the cost of the work performed, and the occurrence of emergency situations.

Deviation of the real trajectory of movement from the planned one occurs due to the appearance of additional disturbing forces both in the transport mode of movement of earth-moving machines and loaders, and during the execution of technological operations.

The review of the scientific and technical literature made it possible to determine the main methods of ensuring road-holding ability of earth-moving machines and loaders. These methods should include:

- automated control of the position of the machine and its working equipment using external tracking systems;
- automated control of the position of the machine and its working equipment on the basis of information received from the sensors installed on the earth-moving machine itself;
- the introduction of additional devices into the construction of earth-moving machines and loaders that change the parameters of the machine itself, the load parameters of the working equipment, the parameters of the environment, etc.

On the basis of the analysis of the designs of modern earth-moving machines and loading machines, as well as the patent search, the main areas of improvement of the machines with the aim of enhancing road-holding ability indicators have been determined and classified. The main modern trends in improving the road-holding ability indicators of earth-moving machines and loaders are the use of such constructive means as satellite systems, laser guidance systems, position control systems by external copier, systems for changing the angle of rotation of steered wheels in the horizontal plane, systems for changing the angle of rotation of wheels in vertical plane, systems for changing the position of the center of gravity of earth-moving machines and loaders, systems for increasing the coupling coefficient, systems for reducing disruptive forces, systems for compensating disruptive forces with additional working forces.

The conducted analysis made it possible to develop several constructive proposals for keeping the machine on the planned trajectory of movement. A comparison of the costs of using certain methods of keeping the machine on the planned trajectory showed that the cheapest one is the use of additional devices that allow changing the parameters of the earth-moving machine and loaders.

Keywords: earth-moving machine, road-holding ability, movement trajectory, maintenance method, constructive proposal.

Вступ

До ЗТМ зазвичай відносять бульдозери, скрепери, автогрейдери, однокошові навантажувачі і т.д. [1]. Характерною особливістю цих машин є дуальність формування режимів навантаження під час експлуатації. Забезпечується це наявністю двох діапазонів швидкостей руху машини. Так, під час переїзду з одного робочого об'єкта на інший, а також

при переміщенні на робочому майданчику ЗТМ можуть рухатися з підвищеними швидкостями (транспортний режим руху). У процесі виконання робочих операцій, пов'язаних з обробкою або переробкою ґрунтів та будівельних матеріалів, ЗТМ переміщуються, як правило, зі зниженими швидкостями (робочий режим руху). У кожному з цих режимів руху можливе відхилення машини від запланованої траєкторії руху. Причиною цього є дія зовнішніх навантажень, що дестабілізують:

- для транспортного режиму це можуть бути відцентрові сили під час руху машини на повороті;

- у робочому режимі це бічні та позацентрово прикладені сили, що діють на робочий орган ЗТМ. Сюди можна додати і додаткові бічні сили від ваги машини у разі, коли ЗТМ працює на майданчику з поперечним ухилом.

Відхилення реальної траєкторії руху ЗТМ від запланованої в робочому режимі призводить до необхідності виконання додаткових проходів, а отже, до зниження продуктивності, збільшення витрати палива та підвищення собівартості продукції. У транспортному режимі можлива поява аварійних ситуацій, пов'язаних із втратою стійкості машини, зіткненням з іншими машинами та елементами навколишнього оточення.

Метою запропонованої статті є класифікація та аналіз методів утримання ЗТМ на запланованій траєкторії руху, розробка конструктивних пропозицій щодо забезпечення курсової стійкості ЗТМ.

Огляд методів, які забезпечують курсову стійкість ЗТМ

Огляд науково-технічних джерел, присвячених забезпеченню курсової стійкості машин, зокрема ЗТМ [2, 3, 4, 5], дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) існує декілька методів, які дозволяють утримати ЗТМ на запланованій траєкторії руху;

- 2) до цих методів відносяться:

- автоматизоване керування положенням машини та її робочого обладнання за допомогою зовнішніх систем стеження;

- автоматизоване керування положенням машини та її робочого обладнання на підставі інформації, отриманої від датчиків, встановлених на самій ЗТМ;

- введення до конструкції ЗТМ додаткових пристосувань, які змінюють параметри самої машини, параметри навантаження робочого обладнання та ін.

Огляд та аналіз конструктивних засобів, які забезпечують курсову стійкість ЗТМ.

Найбільш сучасними методами є керування рухом машини за допомогою супутникових навігаційних систем GPS, GALILEO та інші [4, 6, 7, 8]. Структурна схема такої автоматизованої системи управління рухом представлена на рис. 1.

Перевагами цих систем є: висока точність (можливе відхилення від запланованої траєкторії не перевищує декількох сантиметрів) [8]; можливість повної автоматизації процесу переміщення машини під час виконання технологічної операції. Найбільш відомими представниками подібних пристроїв є фірми Trimble, LeicaGeosystemsCase, TopconPositioningInc [9, 10, 11].

До недоліків супутникових систем автоматизованого управління слід віднести наступне:

- устаткування може бути встановлене тільки на сучасних машинах, які мають електрогідравлічні системи керування виконавчими пристроями. Машини з іншими системами керування не відповідають технічним вимогам. Встановлення супутникових систем на таких машинах недоречно;

- висока вартість у порівнянні з вартістю усієї машини. Це суттєво збільшує собівартість продукції.

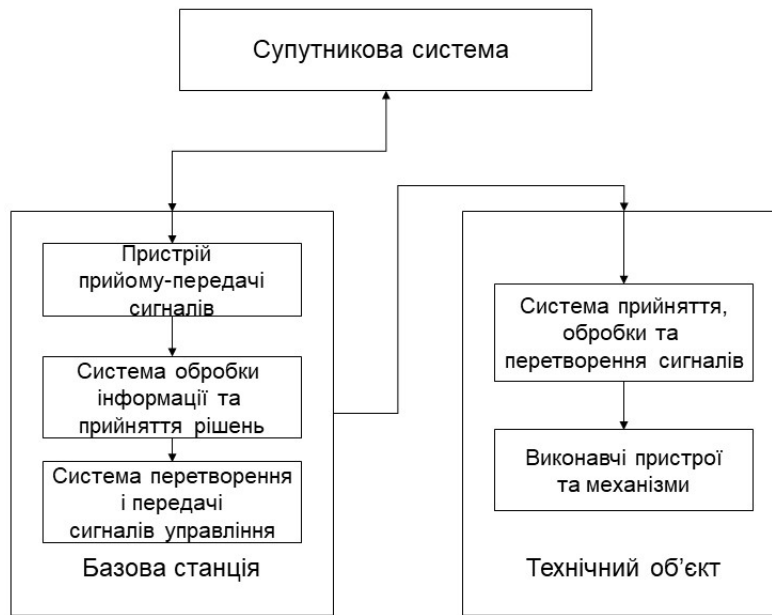


Рис. 1 – Структурна схема супутникової автоматизованої системи керування рухом технічного об'єкта

Таким чином, перед установкою і використанням систем супутникової навігації необхідно виконувати детальний конструкторський і економічний аналіз.

Найбільшого розповсюдження набули системи нівелювання руху технічних об'єктів, зокрема ЗТМ (автогрейдер), за допомогою лазерних і механічних систем копіювання [10, 11]. Наприклад, система "Профіль-30" має двоконтурну систему, яка стабілізує рух автогрейдера за заданим курсом. До складу такої системи входить щуповий датчик і датчик повороту сошки керованого управління. Керованим параметром у підсистемі є відстань від осі автогрейдера до копірного троса. У навігаційних лазерних системах замість троса використовується лазерний промінь. До основних недоліків таких систем відноситься великий обсяг підготовчих робіт, пов'язаних з установкою та налаштуванням для виконання кожної технологічної операції. Це може призвести до спаду продуктивності і підвищення собівартості продукції.

У великій кількості винаходів та серійно виготовляємих систем стабілізації руху машин використовуються штатні засоби керування рухом машини, які на ній вже встановлені. До таких засобів відносять системи управління керованими колесами машин, системи повороту напіврам шарнірно-з'єднаних машин та системи управління ходовим обладнанням гусеничних машин. Зазвичай використовується можливість повороту самої машини у горизонтальній площині для повернення її на заплановану траєкторію руху.

Наприклад, для сільськогосподарчих машин розроблені системи автоматичного підрулювання UniDrive (Угорщина), автопілот GeoSteer фірми AgLeader, автопілот SmarTrax MD фірми Raven та ін. Ці прилади не дозволяють виникати пропускам і напусткам під час проведення аграрних робіт [12,13].

Крім автоматичного регулювання кута повороту керованих коліс у горизонтальній площині, для запобігання бічного зміщення машини використовують метод нахилу коліс у вертикальній площині під час роботи на ухилі, який використовувався у багатьох ЗТМ. Прикладом системи, яка регулює положення керованих коліс машини в залежності від поперечного ухилу опорної поверхні, може служити передній керований міст автогрейдера [14]. Для стабілізації траєкторії руху машини, на ній встановлена система, яка дозволяє в залежності від кута поперечного ухилу опорної поверхні змінювати нахил керованих коліс у вертикальній площині.

Найдешевшим та найпростішим методом забезпечення курсової стійкості технічного об'єкта є введення до його конструкції додаткових приладів (рисунк 2).

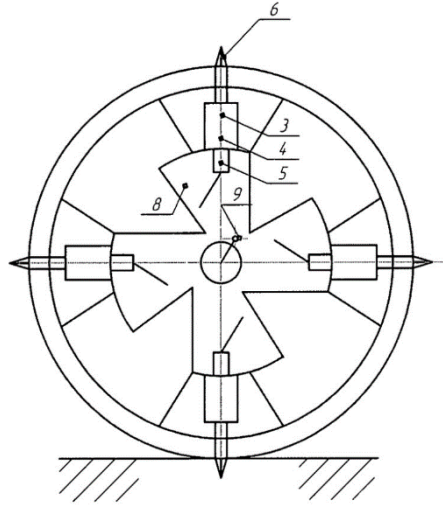


Рис. 2 – Пристрій для уникнення бічних зміщень колеса

Прикладами таких систем є прилади, які забезпечують зростання коефіцієнта зчеплення рушіїв у бічному напрямі [15]. Такі пристрої можливо використовувати тільки в особливих умовах роботи машин на сипких ґрунтових поверхнях.

Деякі автори пропонують встановлювати додаткове робоче обладнання, яке дозволяє компенсувати дію бічних сил з боку основного робочого органу [16]. Для автогрейдерів пропонується разом з основним відвалом встановлювати додатковий відвал, який при виконанні планувальних операцій розвертається протилежно до кута встановлення основного відвала.

На машинах, обладнаних активним робочим органом, багато авторів рекомендують встановлювати системи, які стабілізують напрямок руху, безпосередньо на робочому обладнанні, рисунок 3 [17].

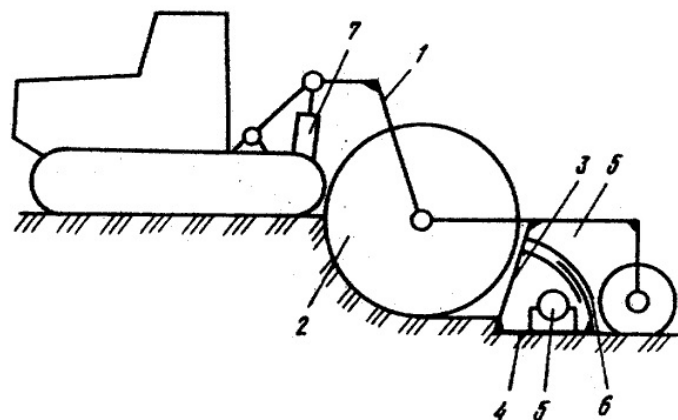


Рис. 3 – ЗТМ з механізмом напрямку руху робочого органу: 1 – рама базової машини; 2 – робочий орган; 3 – зачисний ніж; 4 – опорна лижа; 5 – датчик напрямку руху; 6 – криволінійна телескопічна напрямна; 7 – гідроциліндр

Найчастіше ці системи складаються з двох елементів: датчика напрямку руху і напрямного пристрою. В даному конкретному пристрої замість останнього використовується

опорна лижа. Нерідко пропонується використовувати напрямні пристрої, котрі встановлюються на робочому органі, та формують додаткові сили реакції середовища.

Деякі автори пропонують для утримання машини на запланованій тректоїї руху змінювати положення центра ваги. Прикладами таких систем є технічні рішення [18]. На рисунку 4 представлена конструкція автогрейдера, обладнаного додатковим робочим органом у вигляді розпушувача, який встановлено на рамі в задній частині машини.

Розпушувач виготовлений таким чином, що може рухатись по несучій рамі в поперечному напрямку. Розбіг між значеннями тягових зусиль по бортах балансірного візка дозволяє отримати в горизонтальній площині додатковий крутний момент, який протидіє дестабілізуючим моментам, що викликані зусиллями на робочому органі.

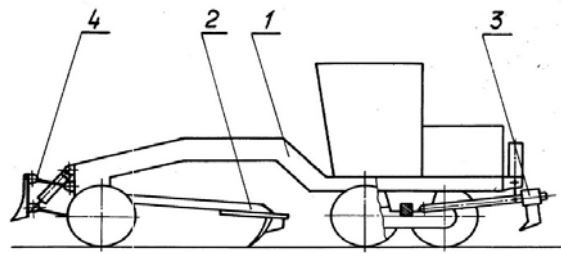


Рис. 4 – Автогрейдер обладнаний рухливою противагою:

1 – самохідне шасі; 2 – грейдерний відвал; 3 – додаткове робоче обладнання у вигляді розпушувача, шарнірно з'єднаного з шасі; 4 – бульдозерний відвал

Аналогічно вирішуються проблема і для колісного трактора (рисунк 5). Ідея зміни положення центра ваги машини вирішується використанням двох рухливих вантажів, встановлених у передній і задній частинах трактора. Таке технічне рішення є більш ефективним, оскільки вантажі можуть рухатись незалежно один від одного, що дозволяє розширити ділянку регулювання положення центра ваги машини.

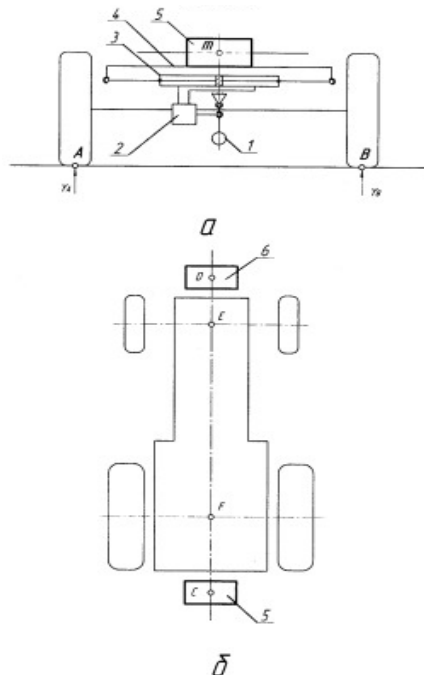


Рис. 5 – Колісний трактор, обладнаний механізмом з рухомим типом вантажів:

а – задній міст транспортного засобу (вид ззаду), обладнаного додатковими вантажами;
б – транспортний засіб, обладнаний додатковими вантажами (вид зверху); 1 – маятниковий датчик; 2 – гідророзподільник; 3 – гідроциліндр; 4 – важіль; 5, 6 – вантаж

Додаткові рухомі вантажі дозволяють змінювати положення центра ваги, що за особливих умов роботи захистить машину не тільки від перекидання, але і від відхилення від запланованої траєкторії руху.

Порівнюючи розглянуті вище конструктивні методи забезпечення курсової стійкості, можна зробити такі зауваження:

- автоматизоване керування рухом ЗТМ (автогрейдера) та автоматизоване регулювання руху дозволяє спростити процес управління машиною та забезпечити необхідне значення показників курсової стійкості. Водночас використання означених методів потребує значних витрат;

- введення в конструкцію машини додаткових пристроїв, які забезпечують курсову стійкість, потребує менших витрат, але також і потребує виконання додаткових наукових досліджень для запобігання оптимального їх використання.

Класифікація методів та напрямів забезпечення курсової стійкості ЗТМ

На підставі проведених оглядових досліджень нами була запропонована класифікація методів та напрямів утримання ЗТМ на запланованій траєкторії руху під час виконання технологічних операцій (робочий режим руху) (рисунк 6). Класифікація враховує емпіричний пошук, виконаний згідно теорії розв’язання винахідницьких задач (ТРВЗ) [19, 20].

Наведена класифікація дозволяє інженерним працівникам зосередитись на розробці відповідних пристроїв згідно запропонованим методам та напрямам удосконалення ЗТМ.

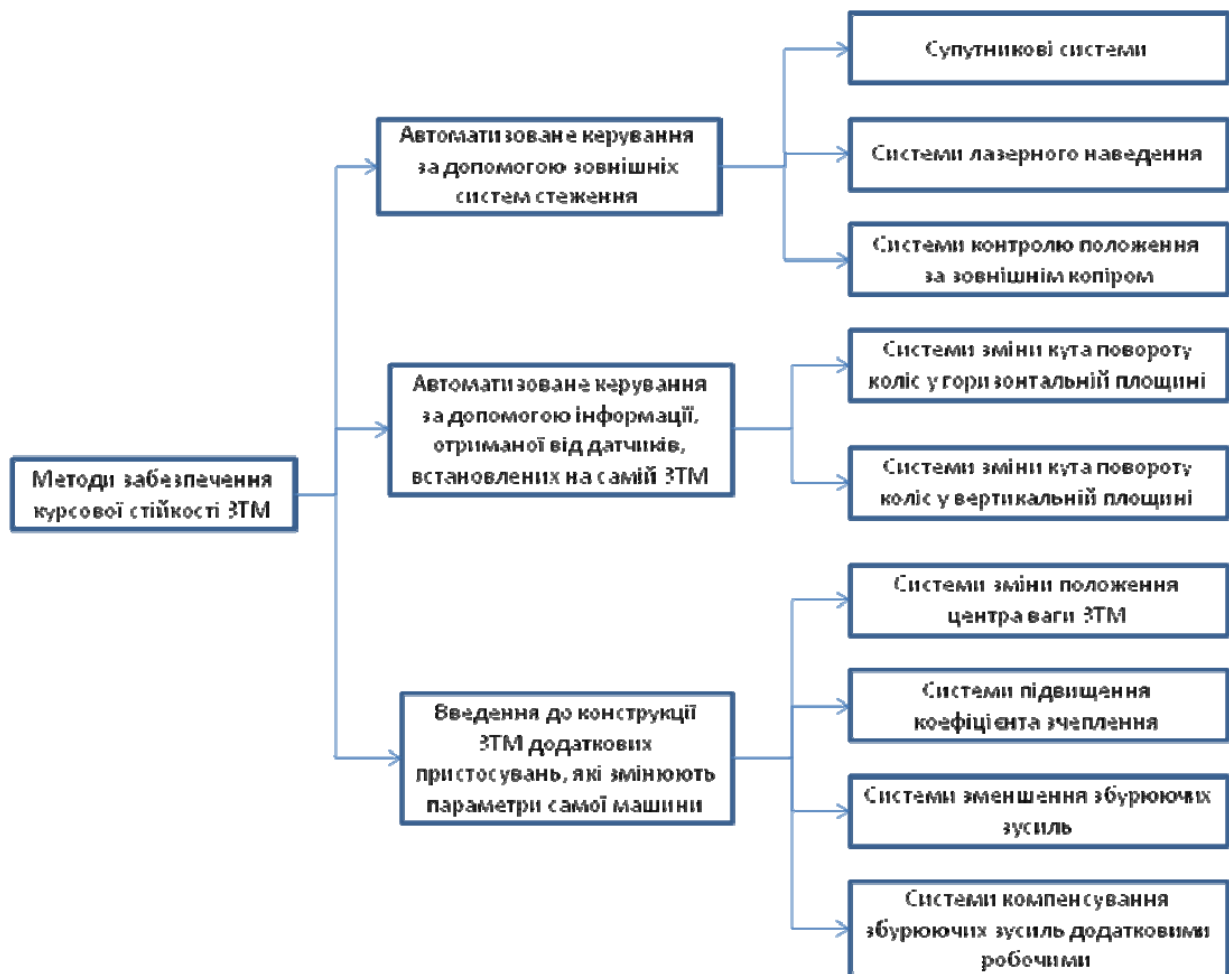


Рис. 6 – Класифікація методів та напрямів утримання ЗТМ на запланованій траєкторії руху під час виконання технологічних операцій

Особливості утримання автогрейдерів на запланованій траєкторії руху

Зазначені вище підходи не в повній мірі відповідають режимам навантаження ЗТМ, зокрема, автогрейдерів. До конструктивних особливостей, які визначають характер навантаження автогрейдерів слід віднести наступне:

- основний відвал розташований у міжколісному просторі, що сприяє покращенню планувальних можливостей машини;
- конструктивні особливості кріплення відвала до основної рами автогрейдера дозволяють оператору переміщати його в просторі і займати різноманітні положення, відповідні технологічній операції, яка виконується.

Останнє визначає особливості формування сил опору з боку розроблювального середовища:

- головний вектор опорів на відвалі може прикладатися асиметрично відносно поздовжньої осі машини, що викликає появу дестабілізуючих крутних моментів;
- під час виконання технологічних операцій встановлення відвала з кутом захоплення, відмінним від 90° , призводить до появи додаткової поперечної складової сил зовнішнього опору.

Конструктивні рішення, які забезпечують курсову стійкість автогрейдера

Для забезпечення стабілізації траєкторії руху, зокрема автогрейдерів, було запропоновано корисні моделі, які дозволяють автоматично керувати положенням керованих коліс [21, 22].

Запропонована гідравлічна система дозволяє відстежити різницю кількості обертів коліс лівого і правого бортів балансирного візка та відкорегувати кут нахилу (рисунок 7) або повороту коліс передньої осі (рисунок 8).

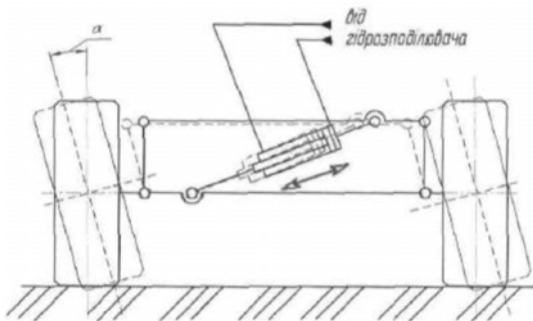


Рис. 7 – Система управління нахилом коліс передньої осі у вертикальній площині

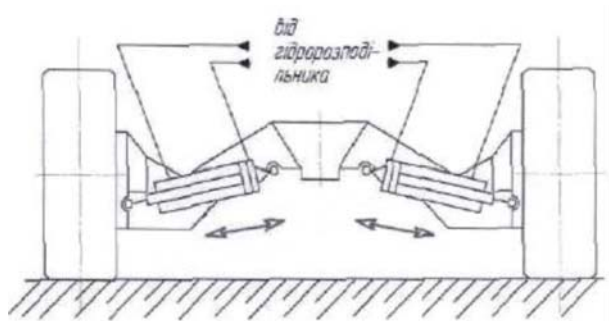


Рис. 8 – Система управління поворотом коліс передньої осі у горизонтальній площині

Нахил коліс у вертикальній площині сприяє зменшенню площини контакту колеса з ґрунтом, що збільшує тиск у зоні контакту колеса з ґрунтом. За рахунок деформації опорної поверхні при нахилі передніх коліс у бік додатково до сил тертя виникають зусилля різання ґрунту самим колесом, що сприяє збільшенню утримуючого моменту в горизонтальній площині. Крім того, під час нахилу коліс, за рахунок асиметричного зміщення центра обертання колеса відносно центра опорної поверхні, виникає додатковий утримуючий момент.

Нахил коліс переднього мосту у вертикальній, так само як і поворот у горизонтальній площині, повинен коригуватись у залежності від напрямку головного вектора сил опору на відвалі, а кут нахилу залежить від значення дестабілізуючого моменту, який виникає завдяки дії сил опору.

Стабілізувати траєкторію руху землерийно-транспортних машин можливо також за допомогою додаткового навісного обладнання [23]. На обертовому бульдозерному обладнанні з гідравлічним приводом обертів встановлено виконавчий пристрій, закомпонований на датчик кута обертів, який встановлено на основному відвалі (рисунок 9). Завдяки бічним силам опору копанню, прикладеним до бульдозерного відвала, зменшується значення дестабілізуючого моменту, що дозволяє утримати машину на запланованій траєкторії.

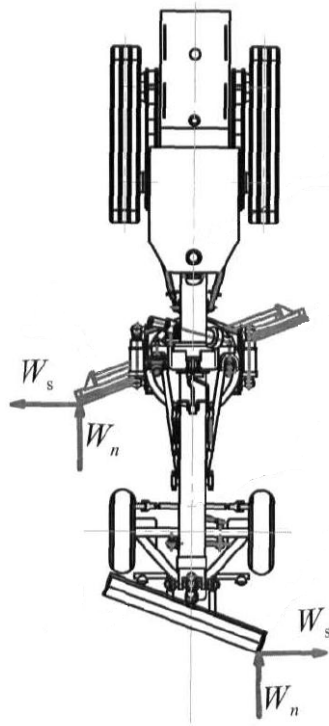


Рис. 9 – Система стабілізації траєкторії руху землерийно-транспортних машин за допомогою додаткового навісного обладнання

Також нами було розроблено і запатентовано систему стабілізації руху автогрейдера [24], яка дозволяє керувати положенням робочого обладнання в просторі за рахунок гідравлічних систем підйому-опускання відвала та виносу відвала в бік. (рисунок 10).

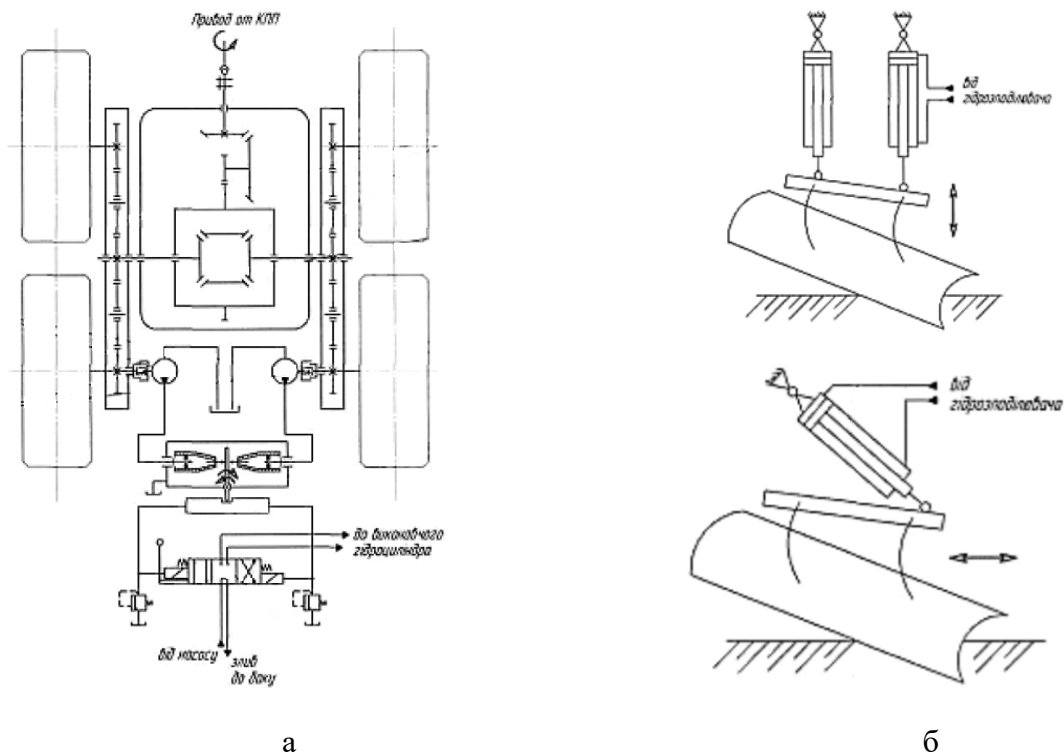


Рис. 10 – Система управління відвалом автогрейдера: а – гідравлічна схема; б – системи управління відвалом

Для стабілізації траєкторії руху автогрейдера також доцільно збільшувати значення бічних утримуючих зусиль на колесах за рахунок використання додаткових ґрунтозачепів [25]. Ґрунтозачеми мають Т-подібну форму та при зануренні в ґрунт збільшують коефіцієнт зчеплення, і як наслідок зменшують бічний зсув.

Висновки

1. Конструктивні методи, які дозволяють стабілізувати траєкторію руху машини, поділяють на три групи:

- системи автоматичного управління, які базуються на аналізі супутникової інформації або інформації про відхилення від попередньо встановлених копірних систем;
- бортові системи автоматичного регулювання, які впливають на системи управління на основі обробки інформації, що надходить від датчиків, встановлених на самій машині;
- додаткові механічні пристрої, які дозволяють впливати на параметри машини і довкілля, забезпечуючи дотримання вимог курсової стійкості в процесі виконання технологічних операцій.

Перша і друга групи розглянутих конструктивних методів достатньо дорогі і потребують використання на машині електрогидравлічних систем управління, що унеможлиблює їх використання на машинах ранніх версій. З нашої точки зору, найбільш раціональним є розробка й установка на ЗТМ, зокрема автогрейдерів, додаткових простих конструкцій механічних систем, які дозволяють утримувати машину на запланованій траєкторії руху. Для обґрунтування параметрів подібних систем потрібне проведення додаткових досліджень, пов'язаних з оцінкою курсової стійкості автогрейдера.

2. Для забезпечення стабілізації траєкторії руху ЗТМ, зокрема автогрейдерів, було запропоновано конструктивні рішення у вигляді корисних моделей в яких реалізовані гідравлічні системи керування положенням робочого обладнання та передніх коліс.

Список використаних джерел:

1. Машини для земляних робіт : навч. посіб. / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. В. Нічке [та ін.]. – Рівне ; Дніпропетровськ ; Харків, 2010. – 575 с.
2. Increase of Stability for Motor Cars in Service Braking [Electronic resource] / M. Podrigalo, A. Turenko, V. Bogomolov [et al.] – Access mode: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1880> (Last accessed 10.12.2022).
3. Хмара Л. А. Сетецентричні технології в ефективному супроводі дорожньо-будівельної техніки / Л. А. Хмара, С. І. Кононов // Вісник ХНАДУ. – 2012. – Вип. 57. – С. 36–42.
4. Теоретичні дослідження динаміки малогабаритного пневмоколісного фронтального навантажувача при автоколиваннях / Л. В. Назаров, С. І. Овсянніков, Л. В. Разарьонов [та ін.] // Вісник ХНАДУ. – 2007. – Вип. 38. – С. 13–17.
5. Коваль А. Б. Визначення умов забезпечення курсової стійкості універсальних землерийних машин : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Коваль А. Б. ; Придніпровська державна академія будівництва. – Дніпропетровськ, 2014. – 21 с.
6. Обладнання для моніторингу транспорту. GPS трекер [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://profgps.ua/gps-treker/?gclid=EAIaIQobChMIp6mJoMCP7wIVi853Ch2e_QrhEAAAYASAAEgJjJPD_BwE (дата звернення 10.12.2022)
7. Galileo is the European global satellite-based navigation system [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system> (Last accessed 10.12.2022)
8. Galileo Satellite Navigation System. Space applications on earth STUDY Panel for the Future of Science and Technology EPRS [Electronic resource]. – Access mode: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614560/EPRS_STU\(2018\)614560_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614560/EPRS_STU(2018)614560_EN.pdf) (Last accessed 10.12.2022)
9. Trimble Grade Control for Motor Graders 3D Grade Control for Motor Graders [Electronic resource]. – Access mode: <https://heavyindustry.trimble.com/en/products/grade-control-motor-graders> (Last accessed 10.12.2022).
10. Leica iCON iGG2 2D Solution. Intelligent 2D grading solutions for motor graders [Electronic resource]. – Access mode: <https://leica-geosystems.com/en-us/products/machine-control-systems/grader/leica-icon-igg2-2d-grader-solution> (Last accessed 10.12.2022)
11. Rough and Fine Grading 3D-MC2 Grader [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.topconpositioning.com/grading/3d-motor-grader-systems/3d-mc2-grader> (Last accessed 10.12.2022).

12. SteadySteer.Pass-to-pass accuracy - right from your steering wheel [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.agleader.com/guidance-and-steering/steadysteer/> (Last accessed 10.12.2022).
13. Unidrive M. Офіційна сторінка компанії «Приводні Системи» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.privodsys.ru/katalog/unidrive-m/> (дата звернення 10.12.2022).
14. Пат. 1614941 СССР, МПК В60К17/30. Управляемый мост автогрейдера [Электронный ресурс] / Воронин А. Н. [и др.]. – № 4630828/25-1; заявл. 03.01.1989; опубл. 23.12.1990, Бюл. № 47. – 3 с. – Режим доступа: <https://patents.su/3-1614941-upravlyayemyjj-most-avtogrejdera.html> (дата обращения 11.11.2020 р.)
15. Пат. 84309U1 РФ, МКИ В60В 15/18. Устройство противоскольжения для колеса транспортного средства / Махмутов М. М. [и др.]. – № 95103566 ; заяв. 13.03.95 ; опубл. 20.12.96, Бюл. № 35. – 5 с.
16. Пат. 116183 Україна, МПК В60В15/08, В60В15/26. Система стабілізації траєкторії руху землерийно-транспортних машин / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М., Буханцова Г. Д. – № 201612014 ; заяв. 28.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.
17. Пат. 1059082 СССР, МПК E02F5/08, E02F3/26. Механизм направления движения рабочего органа землеройной машины / Егоров Ю. П. [и др.]. – № 3363510/29-03 ; заявл. 08.12.1981 ; публ. 07. 12.1983, Бюл. № 45. – 2 с.
18. Пат. 2399538 РФ, МПК В62D37/04. Способ стабилизации положения колесного транспортного средства / Тарасова С. А. [и др.]. – № 2008146172/11 ; заявл. 21.11.2008 ; публ. 27.05.2010, Бюл. № 26. – 2 с.
19. Основи творення машин / М. Я. Бучинський, О. В. Горик, А. М. Чернявський, С. В. Яхін ; за ред. О. В. Горика. – Харків : НТМТ, 2017. – 448 с.
20. Krick E. V. An Introduction To Engineering: Methods, Concerns and Issues / E. V. Krick. – New York : John Wiley & Sons, 1976. – 358 p.
21. Пат. 114044 Україна, МПК F16H39/00, F16H43/00. Система стабілізації траєкторії руху автогрейдера за допомогою коригування нахилу коліс / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М. – № 201609081 ; заяв. 29.08.2016 ; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4. – 4 с.
22. Пат. 120651 Україна, МПК F16H39/00, F16 H43/00. Система стабілізації траєкторії руху автогрейдера за допомогою коригування кута повороту коліс / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М., Щербак О. В., Максимів Ю. М. – № 2017 05441 ; заяв. 02.06.2017 ; опубл. 10.11.2017, Бюл. № 21. – 4 с.
23. Пат. 141678 Україна, МПК E02F 3/76 (2006.01). Система стабілізації траєкторії руху землерийно-транспортних машин за допомогою додаткового навісного обладнання / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М., Резніков О. О. – № u 2019 09204 ; заяв. 08.08.2019 ; опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8. – 4 с.
24. Пат. 114013 Україна, МПК F16H39/00, F16H43/00. Система стабілізації траєкторії руху автогрейдера / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М. – № 2016 08781 ; заяв. 29.08.2016 ; опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4. – 4 с.
25. Пат. 116183 Україна, МПК В60В15/08, В60В15/26. Система стабілізації траєкторії руху землерийно-транспортних машин / Шевченко В. О., Чаплигіна О. М., Буханцова Г. Д. – № 201612014 ; заяв. 28.11.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.

References

1. Khmara, LO et al. 2010, *Mashyny dlya zemlyanykh robot, Rivne, Dnipropetrovsk, Kharkiv*.
2. Podrigalo, M et al. 2018, *Zbilshennya stabilnosti dlya motornykh avtomobiliv u sluzhbi bronyuvannya*, viewed 10 December 2022, <<https://doi.org/10.4271/2018-01-1880>>.
3. Khmara, LA & Kononov, SI 2012, 'Setetsentrychni tekhnolohiyi v efektyvnomu suprovodi dorozhno-budivelnoyi tekhniki', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, iss. 57, pp. 36-42.
4. Nazarov, LV et al. 2007, 'Teoretychni doslidzhennya dynamiky malohabarytnoho pnevmokolisnoho frontalnoho navantazhuvacha pry avtokolivanni', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, iss. 38, pp. 13-17.
5. Koval, OB 2014, 'Vyznachennya umov zabezpechennya kursovoyi stiykosti universalnykh zemlerynykh mashyn', Doc.tehn.n. abstract, Prydniprovskaya derzhavna akademiya budivnytstva, Dnipropetrovsk.
6. Obladnannya dlya monitorynhu transportu. GPS treker n.d., viewed 10 December 2022, <https://profgps.ua/gps-treker/?gclid=EAIaIQobChMlp6mJoMCP7wIVi853Ch2e_QrhEAAAYASAAEgJjJPD_BwE>
7. Galileo ye Yevropeyskym hlobalnym satellite-based navigation system n.d., viewed 10 December 2022, <<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/galileo-european-global-satellite-based-navigation-system>>.
8. Galileo Satellite Navigation System. Space applications on earth STUDY Panel for Future of Science and Technology EPRS 2018, viewed 10 December 2022, <[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614560/EPRS_STU\(2018\)614560_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/614560/EPRS_STU(2018)614560_EN.pdf)>.
9. Trimble Grade Control dlya Motor Graders 3D Grade Control dlya Motor Graders n.d., viewed 10 December 2022, <<http://heavyindustry.trimble.com/en/products/grade-control-motor-graders>>.
10. Leica iCON iGG2 2D Solution. Intelligent 2D grading solutions for motor graders n.d., viewed 10 December 2022, <<https://leica-geosystems.com/en-us/products/machine-control-systems/grader/leica-icon-igg2-2d-grader-solution>>.
11. Rough and Fine Grading 3D-MC2 Grader n.d., viewed 10 December 2022, <<https://www.topconpositioning.com/grading/3d-motor-grader-systems/3d-mc2-grader>> .

12. SteadySteer.Pass-to-pass accuracy - right from your steering wheel n.d., viewed 10 December 2022, <<https://www.agleader.com/guidance-and-steering/steadysteer/>>.
13. Unidrive M. Ofitsiyna storinka kompaniyi Pryvodni Systemy n.d., viewed 10 December 2022, <<http://www.privodsys.ru/katalog/unidrive-m/>>.
14. Voronin, AN et al. 1990, *Upravlyayemyy most avtogreydera*, SSSR Patent 1614941, viewed 11 November 2022, <<https://patents.su/3-1614941-upravlyaemyjj-most-avtogrejdera.html>>.
15. Makhmutov, MM et al. 1996, *Ustroystvo protivoskolzheniya dlya transportnykh sredstv*, RF Patent 84309U1.
16. Shevchenko, VO, Chaplygina, OM & Bukhantsova, GD 2017, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu zemleroyno-transportnykh mashyn*, UA Patent 116183.
17. Yegorov, YuP et al. 1981, *Mekhanizm napravlenniya dvizheniya rabocheho organa zemleroynoy mashiny*, SSSR Patent 1059082.
18. Tarasova, SA et al. 2010, *Sposob stabilizatsii polozheniya kolesnogo transportnogo sredstva*, RF Patent 2399538.
19. Buchynskyy, MYa, Horyk, OV, Chernyavskyy, OM & Yakhin, SV 2017, *Osnovy tvorenniya mashyn*, NTMT Kharkiv.
20. Krick, EV 1976, *An Introduction To Engineering: Methods, Concerns and Issues*, John Wiley & Sons, New York.
21. Shevchenko, VO & Chaplyhina, OM 2017, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu avtohtreydera za dopomohoyu koryhuvannya nakhyly kolis*, UA Patent 114044.
22. Shevchenko, VO, Chaplyhina, OM, Shcherbak, OV & Maksymiv, YuM 2017, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu avtohtreydera za dopomohoyu koryhuvannya uhla povorotu kolis*, UA Patent 120651.
23. Shevchenko, VO, Chaplyhina, OM & Ryznikov, OO 2019, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu zemleroyno-transportnykh mashyn za dopomohoyu dodatkovoho navisnoho obladnannya*, UA Patent 141678.
24. Shevchenko, VO & Chaplyhina, OM 2017, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu avtohtreydera*, UA Patent 114013.
25. Shevchenko, VO, Chaplyhina, OM & Bukhantsova, HD 2017, *Systema stabilizatsiyi trayektoriyi rukhu zemleroyno-transportnykh mashyn*, UA Patent 116183.

Стаття надійшла до редакції 10 січня 2023 р.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФРОНТАЛЬНИХ НАВАНТАЖУВАЧІВ

© Кириченко І.Г., Мусаєв З.Р., Вороновський Д.В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Інформація про авторів:

Кириченко Ігор Георгійович: ORCID: 0000-0002-2128-3500; kyrig@ukr.net; доктор технічних наук; професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Мусаєв Заур Разілович: ORCID: 0000-0002-5533-0897; zaur.musaiev92@gmail.com; кандидат технічних наук, асистент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Вороновський Деніс Валентинович: аспірант кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

В статті представлені результати комп'ютерного моделювання навантажувачів середнього класу з шарнірними рамами, а також малогабаритних навантажувачів з бортовим механізмом повороту. Використання модульних технологій віртуального проєктування технічних об'єктів, а також модульного формування програмних засобів в середовищах Autodesk Inventor та Ansys дозволяє суттєво прискорити процес створення нових машин та їх віртуальних випробувань з метою оптимізації конструктивного виконання. Запропоновано впровадження віртуальних лабораторій для проведення науково-дослідницьких і проєктних робіт в машинобудівній царині. Представлені результати роботи викладачів і студентів механічного факультету ХНАДУ зі створення таких лабораторій і деяких результатів віртуальних досліджень на прикладі фронтальних навантажувачів.

Ключові слова: навантажувач, віртуальна лабораторія, комп'ютерне моделювання.

Kyrychenko I., Musaiev Z., Voronovsky D. «Computer simulation of front loaders».

The article presents the results of computer modeling of medium class loaders with articulated frames, as well as small-sized loaders with an on-board turning mechanism. The use of modular technologies for the virtual design of technical objects, as well as the modular formation of software tools in the Autodesk Inventor and Ansys environments, allows significantly speeding up the process of creating new machines and their virtual tests in order to optimize the constructive execution. It is proposed to introduce virtual laboratories for conducting research and project work in the field of machine building. The paper presents the results of the work of teachers and students of the Mechanical Faculty of Kharkiv National Automobile and Highway University dedicated to the creation of such laboratories, and some results of virtual research based on the example of front loaders.

Keywords: loader, virtual laboratory, computer simulation.

Вступ

Сучасний стан виготовлення та експлуатації технологічних машин характеризується впровадженням модульних технологій і конструктивних рішень [8]. Відомі світові виробники дорожньо-будівельної і комунальної техніки намагаються не тільки розширювати діапазон основних параметрів машин, що вже випускаються, а й збільшувати різноманітність

технічних рішень робочого і ходового обладнання цих машин. Удосконалення методів проєктування машин за рахунок переходу на комп'ютерно-інтегровані технології розрахунків, виконання креслень і 3D моделей, на яких можна проводити віртуальні дослідження, дає можливість суттєво скорочувати час на розробку технічної документації і постановку серійного виробництва.

Комп'ютерне моделювання надає великі можливості для скорочення часу проєктування машин, тому що конструктор може відворити декілька варіантів технічних рішень і оцінити їх ефективність по вибраним критеріям. Але досвід роботи по створенню комп'ютерних моделей машин і їх віртуальним випробувань, що накопичений в ХНАДУ, показує на необхідність створення віртуальних лабораторій. Віртуальна лабораторія, в нашому уявленні, це система розроблених програмних засобів зорієнтованих на вирішення конкретних локальних задач при застосуванні середовищ Autodesk Inventor, Ansys та інших.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Комп'ютерне моделювання один з найпотужніших інструментів яким в наш час користуються інженери, що розробляють зразки дорожньо-будівельної техніки. Комп'ютерне моделювання це процес проєктування реальної машини, а також проведення віртуальних експериментів на цифровому об'єкті замість реального [1-3]. Комп'ютерні 3D моделі дозволяють досліджувати віртуальні машини у такий спосіб, що є неможливим при теоретичних дослідженнях. Комп'ютерне моделювання машин вирішує дві головні задачі: перше, це моделювання реальних технічних об'єктів у вигляді деталей, вузлів, агрегатів і з рештою самої машини, по друге це створення спрощених 3D моделей об'єктів на яких можна проводити випробування, експерименти і дослідження замість реальних машин. У першому варіанті є можливість виконання всіх необхідних 2D креслень та інших графічних і нормативних документів, що необхідні при проєктуванні машин [1-4].

Тому головним завданням яке вирішувалося на цьому етапі було формулювання вимог і алгоритмів створення 3D моделей для проведення експериментальних досліджень з метою надання рекомендацій для конструкторів технологічних машин на прикладі фронтальних навантажувачів.

Основний зміст

Комп'ютерне моделювання в ХНАДУ виконується за допомогою пакету Autodesk Inventor Series. Основою цього пакета була програма Inventor Professional, що дозволяла створювати докладну цифрову модель виробу – цифровий прототип – моделюючи не тільки геометрію деталей, але і їх основні фізичні властивості [6]. З виходом нових версій програми, у яких було додане середовище динамічного моделювання та розрахунків на основі методу скінченних елементів, з'явилася можливість не просто моделювати рух механізму, а й проводити віртуальні експерименти з розробленими цифровими прототипами. Важливим аспектом досліджень у цих питаннях стає визначення необхідної деталізації моделей і припустимих спрощень.

Однією з найбільш затребуваною групою машин в різноманітних сферах будівельного і комунального виробництва є фронтальні навантажувачі. Машини цього типу, крім іншої продукції виготовляють всесвітньо відомі фірми «Caterpillar», «Volvo», «Libherr», «JCB», «Komatsu», «GEHL», «Mustang», «Case», «John Deere», «New Holland», а також деякі інші. Фронтальні навантажувачі умовно можна розділити на дві категорії в залежності від типу ходового обладнання: це машини з шарнірними рамами і машини з бортовим механізмом повороту.

Проектування навантажувачів вступило в новий етап розвитку, коли разом із зростанням складності проєктів досягається скорочення термінів та підвищення якості розробок, значною мірою за рахунок автоматизації і комп'ютеризації інженерних робіт.

Найбільшого поширення дістали інтерактивні системи, які дозволяють конструктору в ході одержання проєктних рішень вести діалог з комп'ютером на природній мові комп'ютерної графіки, де застосовуються геометричні моделі об'єктів, процесів та явищ, як найбільш наочні і зрозумілі інженеру. Вони забезпечують впровадження математичних методів у проєктування та технологічні процеси, займаючи все більш помітне місце серед ефективних інструментів інженерної діяльності [5].

Аналіз конструктивного виконання навантажувачів від передових виробників показує, що фірмами застосовується система «генетичного» проєктування, тобто структура об'єкту, що проєктується, залишається практично незмінною. Машини відрізняються своїми основними параметрами, такими як місткість базового ківша, маса, потужність тощо.

Таблиця 1 – Навантажувачі Libherr

Модель	Ківш (м ³)	Маса (т)	Потужність (кВт)
L 524	1,7	10,4	86,0
L 538	2,2	12,8	104
L 550	3,1	17,8	168
L 560	3,5	23,5	200
L 580	4,5	26,9	219
L 586	5,0	32,6	263

Таблиця 2 – Навантажувачі JCB

Модель	Ківш (м ³)	Маса (т)	Потужність (кВт)
407	1,0	5,11	48
409	1,2	5,95	55
411	1,4	8,72	81
417	1,6	9,60	97
427	2,4	14,31	123
437	2,7	15,17	145
457	3,5	20,19	210

В таблицях представлені ці показники навантажувачів тільки на прикладі навантажувачів Libherr і JCB де місткість ківша q (м³), маса машини m (т), потужність двигуна N (кВт). В результаті обробки статистичної інформації встановлені наступні закономірності. Маса в тонах залежить від місткості ківша і визначається за формулою: $m=(5,1-6,7)q$, відповідно потужність залежить від маси машини: $N=(8,1-10,4)m$. Таким чином, для навантажувачів цієї групи достатньо розробити одну базову комп'ютерну модель, а потім тільки змінювати масштаб моделювання, як це робиться при створенні фізичних моделей. Слід зазначити, що проведення експериментів на комп'ютері дає змогу моделювати заданий процес із необмеженою кількістю варіантів і повторів, змінювати при цьому необхідні для дослідження параметри – це у свою чергу дозволяє одержати більше даних, які надалі можуть бути використані для оптимізації умов експлуатації фронтального навантажувача, або іншої машини [13]. В межах розробленої віртуальної лабораторії було сформовано декілька комп'ютерних моделей навантажувачів, які дозволяли вирішувати різноманітні конструкторські і дослідницькі завдання.

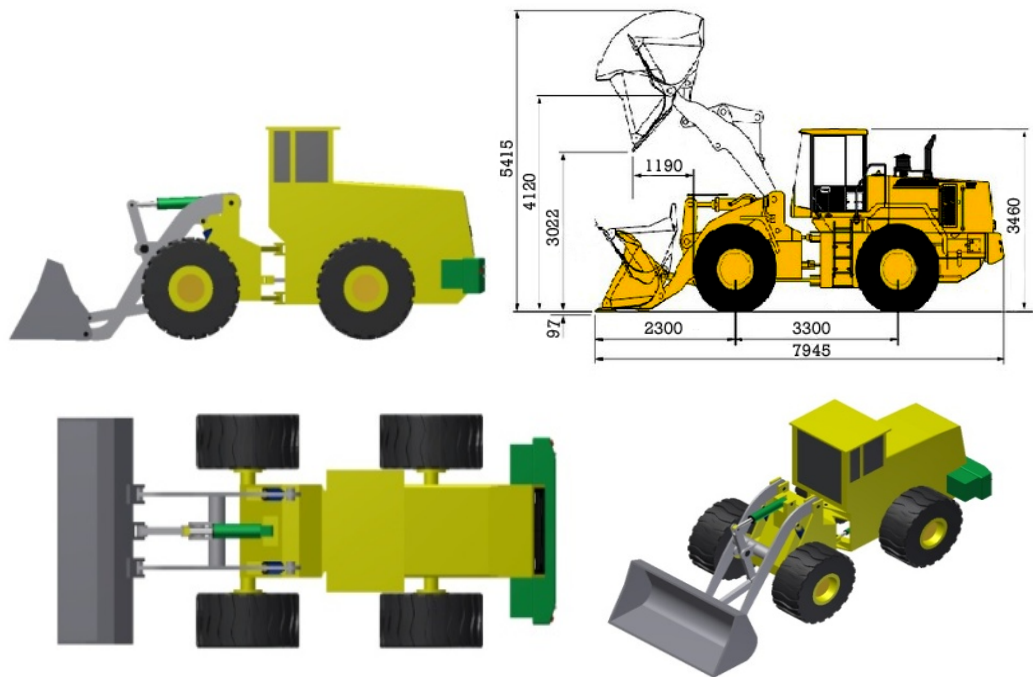


Рис.1 – Загальний вид навантажувача та його 3D модель

Комп'ютерна 3D-модель навантажувача середнього класу (рис.1.), побудована в Autodesk Inventor, дозволяє ще на стадії проєктування визначити критичні умови роботи машини. У розрахунках будівельних і дорожніх машин приймається, що центр ваги машини є фіксованим, нерухомим, а насправді він постійно змінює своє положення, як в статиці, так і при русі машини. Зміщення центру ваги значно впливає на ефективність роботи машини, на його тягові можливості, навантаженість металоконструкцій робочого і ходового обладнання, а з рештою і на стійкість, як у транспортному, так і в робочому режимах. Створення віртуальної лабораторії дозволяє досліджувати зміну положення центру тяжіння в реальному часі, при цьому з'являється можливість варіювати початковими параметрами машини.

Для дослідження зміни положення центру ваги була розроблена 3D модель (рис.2.), яка складалася з трьох конструктивних модулів: енергетичного (задня напіврама з кабіною, двигуном і приводом ведучих колес), технологічного (передня напіврама з робочим обладнанням) і окремо ківша (з можливістю зміни його розмірів і характеру вантажів) [9].

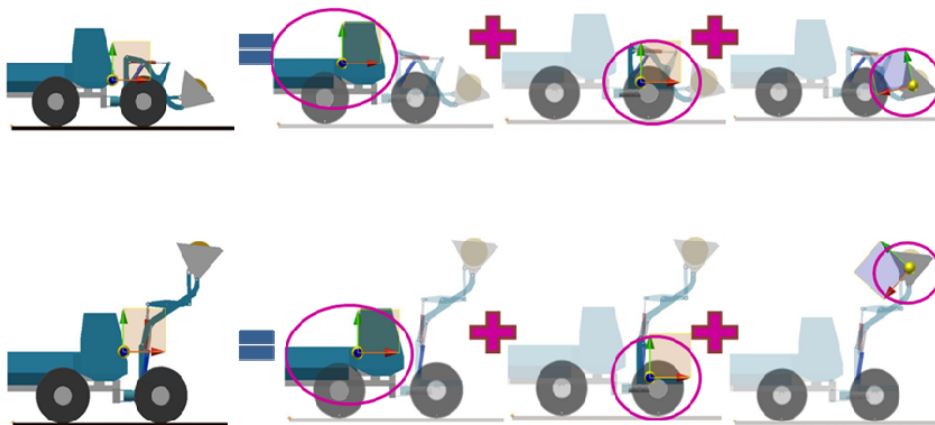


Рис. 2 – Схема зміщення положення координат центру ваги для верхнього і нижнього положень

Інші комп'ютерні моделі, у межах цієї віртуальної лабораторії дозволяли досліджувати фактори, що діють у транспортних режимах. Визначалися реакції на ведучих колесах при наїзді на перешкоду, або при русі по наперед заданому профілю дороги, при цьому експерименти проводилися для різних значень швидкості, а також при заданому характері зміни швидкості. Були встановлені критичні бокового ухилу і швидкості повороту машини з точки зору її стійкості в транспортному режимі. Найскладнішим питанням виявилось моделювання тягово-зчепних якостей і отримання кривої ковзання (рис.3.)

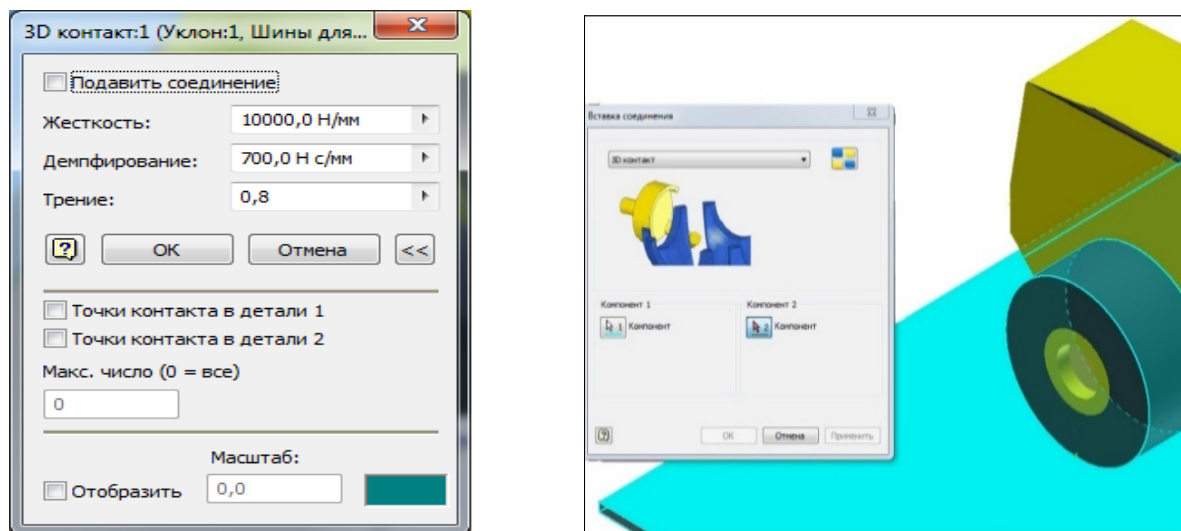


Рис. 3 – Параметры 3D контакта с опорной поверхнью

Друга група машин, що моделювалися у відповідній віртуальній лабораторії були навантажувачі з бортовим механізмом повороту. Найбільш відомими виробниками таких машин є «BOBCAT», «Caterpillar», «Volvo», «JCB», «Komatsu», «GENL», «Mustang», «Case», «John Deere», «New Holland», «Locust» та ін. В цих машинах застосовується гідрооб'ємний привід ходового обладнання [7; 10]. Для цієї групи машин співвідношення між місткістю ківша, масою машини і потужністю двигуна виглядає наступним чином [14]:

$$m=(2,8-4,3)q, \quad N=(10,2-12,1)m.$$

Autodesk Inventor дозволяє підтримувати роботу з достатньо складними проектами і моделями. Але в інженерній і дослідницькій практиці краще використовувати спрощені комп'ютерні моделі з метою прискорення отримання результатів. Моделювання малогабаритних навантажувачів здійснювалося з використанням модульної технології будови програмних продуктів власного виробництва [8], а також використовувались модулі бібліотеки стандартних компонентів (рис.4.). В середовищі «Simulation» закладені закономірності Ньютонівської механіки, але ми не можемо знати якими саме рівняннями користується комп'ютер. Тому слід використовувати кібернетичний підхід при отриманні результатів віртуальних дослідів з машинами, або їх складовими частинами [11-12].

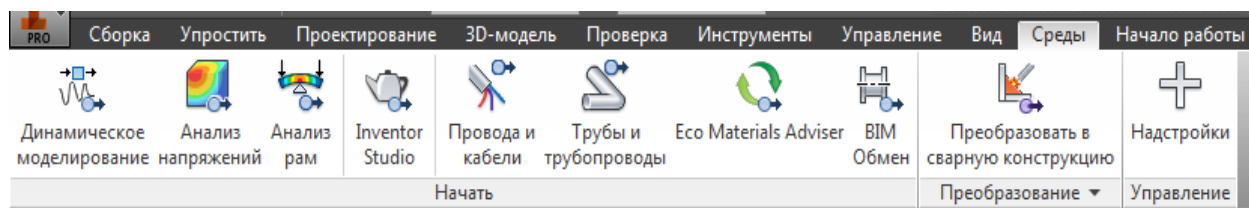


Рис. 4 – Розрахункові модулі програмного комплексу Autodesk Inventor

Всі необхідні команди для розрахунку динамічних процесів було проаналізовано та обрано у додатковому модулі «Динамічне моделювання», який розташовано у вкладці «середовища».

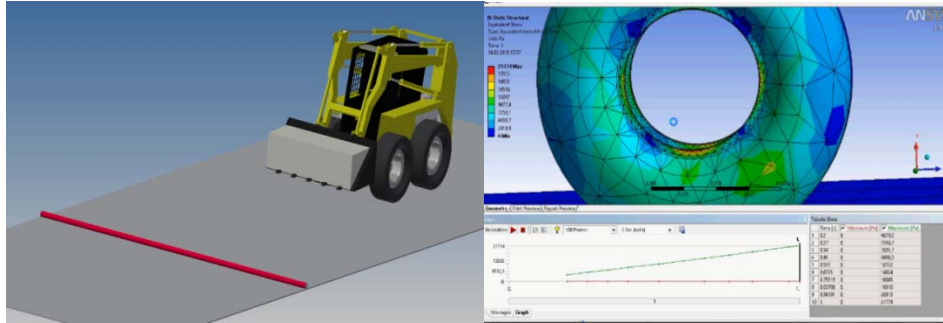


Рис. 5 – Візуалізація переїзду через перешкоду та навантаження колеса

Програмний модуль Autodesk Inventor «Динамічне моделювання» дозволяє вирішувати контактні задачі, зокрема визначати зміну нормальних реакцій на колесах навантажувача в різноманітних режимах роботи. Було досліджено зміну навантажень на колесах навантажувача при подоланні одиночної перешкоди. При проведенні віртуальних експериментів змінювалися параметри перешкоди (розміри, форма). Разом з цим була перевірена можливість експорту моделей в програмний комплекс ANSYS Workbench для подальшого аналізу деформованого стану колеса при подоланні перешкоди (рис.5.). Отримані при проведенні віртуальних експериментів результати були порівнювались з результатами отриманими на фізичних моделях.

Висновки

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання навантажувачів різноманітного конструктивного виконання, а також порівняння отриманих даних з матеріалами експериментальних досліджень, що проводилися на натурних зразках машин, або на фізичних моделях, показує що відхилення окремих показників складають від 10 до 35 %.

Моделювання деяких процесів реальних машин викликають певні труднощі і поки що не можуть бути застосовані в науково-дослідницькій роботі і бути підґрунтям для формування практичних рекомендацій щодо зміни конструктивного виконання машин, зокрема навантажувачів. В першу чергу це стосується процесів взаємодії робочих органів з ґрунтом та іншими матеріалами.

Перспективним напрямком удосконалення методів комп'ютерного моделювання є створення віртуальних лабораторій на базі яких з мінімальними затратами часу можуть бути отримані достовірні результати робочих і транспортних операцій машин і їх окремих складових частин.

Список використаних джерел:

1. Younis W. Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011: A step-by-step guide to engineering design solutions / W. Younis. – Oxford : Elsevier, 2010. – 444 p.
2. Технология цифровых прототипов. Autodesk Inventor 2010. Официальный учебный курс. – Серия: САПР от А до Я. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 944 с.
3. Allen L. AutoCAD: Professional Tips and Techniques (Really Useful Ebooks) / L. Allen, S. Onstott. – Indianapolis : Wiley Publishing Inc., 2007. – 336 p.
4. Marsh D. Applied Geometry for Computer Graphics and CAD / D. Marsh. – 2 ed. – London : Springer, 2005. – 366 p.
5. Основи технічного регулювання будівельно-дорожніх машин : навч. посіб. МОН / І. Г. Кириченко [та ін.]. – Харків : ХНАДУ, 2014. – 512 с.

6. Аврун Г. А. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин : підручник / Г. А. Аврун, І. Г. Кириченко, В. Б. Самородов. – Харків, 2016. – 436 с.
7. Объёмный гидропривод в мобильных подъемниках с рабочими платформами / И. Г. Кириченко [и др.]. – Харьков : ХНАДУ, 2018. – 295 с.
8. Кириченко І. Г. Особливості комп'ютерного і фізичного моделювання екскаваторів / І. Г. Кириченко, О. Г. Гурко, О. В. Ярижко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование. – 2018. – Вып. 103. – С. 75–82.
9. Назаров Л. В. Динамическая устойчивость короткобазового погрузчика с бортовой системой поворота / Л. В. Назаров, Л. В. Разаренов // Науковий вісник будівництва. – 2009. – Вип. 55. – С. 217–224.
10. Єфименко О. В. Аналіз завантаженості гідроприводу малогабаритного навантажувача за допомогою simulink-моделей / О. В. Єфименко, О. В. Ярижко // Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 57. – С. 117–120.
11. Гейчук В. М. Динамічне моделювання механізмів верстатів та машин в Autodesk Inventor : навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. М. Гейчук, С. В. Вакуленко. – Київ : НТУУ "КПІ", 2015. – 167 с.
12. Дияконів В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 у математиці й моделюванні : повний посіб. користувача / В. П. Дияконів. – М. : Солоний-Пресс, 2003. – 576 с.
13. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
14. Нефьодов І. О. Засоби зменшення динамічних навантажень на вантажопідійомник фронтального навантажувача : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.05 / Нефьодов Іван Олександрович ; Одес. нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2014. – 22 с.

References

1. Younis, W 2010, *Up and Running with Autodesk® Inventor® Simulation 2011 : A step-by-step guide to engineering design solutions*, Elsevier, Oxford.
2. *Tekhnolohiya tsyfrovyykh prototypov. Autodesk Inventor 2010. Ofytsyalnyi uchebnyi kurs, Seryia: SAPR ot A do Ya* 2010, DMK Press, Moskva.
3. Allen, L & Onstott, S 2007, *AutoCAD: Professional Tips and Techniques*, Wiley Publishing Inc., Indianapolis.
4. Marsh, D 2005, *Applied Geometry for Computer Graphics and CAD*, 2nd edn, Springer, London.
5. Kyrychenko, IH, Trishch, RM, Yanushkevych, DA, Moliavko, VI & Petrukovich, DІe 2014, *Osnovy tekhnichnoho rehulivannia budivelno-dorozhnikh mashyn*, Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet, Kharkiv.
6. Avrunin, HA, Kyrychenko, IH & Samorodov, VB 2016, *Hidravlichne obladnannia budivelnykh ta dorozhnikh mashyn*, Kharkiv.
7. Kirichenko, IH, Avrunin, GA, Samorodov, VB & Yaryzhko, AV 2018, *Obyemnyy gidroprivod v mobilnykh podyemnikakh s rabochimi platformami*, Kharkivskiy natsionalnyi avtomobilno-dorozhniy universytet, Kharkiv.
8. Kyrychenko, IH, Hurko, OH & Yaryzhko, OV 2018, 'Osoblyvosti kompiuternoho i fizychnoho modelivannia ekskavatoriv', *Stroytelstvo. Materyalovedenye. Mashynostroenye*, Seryia Podyemno-transportnyye, stroitelnyye, dorozhnyye mashyny i oborudovaniye, iss. 103, pp. 75-82.
9. Nazarov, LV & Razarenov, LV 2009, 'Dinamicheskaya ustoychivost korotkobazovogo pogruchika s bortovoy sistemoy povorota', *Naukovyi visnyk budivnytstva*, Kharkivskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury, Kharkiv, iss. 55, pp. 217-224.
10. Iefymenko, OV & Yaryzhko, OV 2012, 'Analiz navantazhenosti hidropriyvodu malohabarytnoho navantazhuvacha za dopomohoiu simulink-modelei', *Visnyk Kharkivskogo natsionalnogo avtomobilno-dorozhnogo universytetu*, iss. 57, pp. 117-120.
11. Heichuk, VM & Vakulenko, SV 2015, *Dynamichne modelivannia mekhanizmiv verstativ ta mashyn v Autodesk Inventor*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi institut, Kyiv.
12. Dyiakoniv, VP 2003, *MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5 u matematytsi y modelivanni*, Soloniy-Press, Moskva.
13. Aliamovskiy, AA (et al.) 2005, *Solid Works. Kompiuternoe modelirovaniye v ynzhenernoi praktike*, BKhV-Peterburh, Sankt-Peterburh.
14. Nefodov, IO 2014, 'Zasoby zmenshennia dynamichnykh navantazhen na vantazhopididomnyk frontalnoho navantazhuvacha', Kand.tekhn.n. abstract, Odeskiy natsionalnyi politekhnichnyi universytet, Odesa.

Стаття надійшла до редакції 10 січня 2023 року

ПОБУДОВА РОЗРАХУНКОВОЇ СХЕМИ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ РОЗБІРНИХ ПАЛЕТНИХ СТЕЛАЖІВ

© Резніченко О.І., Рубашка В.П.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Інформація про авторів:

Резніченко Олексій Іванович: reznichenko.aleksey@gmail.com; студент кафедри Підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Рубашка Володимир Петрович: ORCID: 0000-0002-9856-3850; uirakriv@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри Підйомно-транспортних машин і обладнання; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Стаття присвячена розвитку методів аналізу стійкості розбірних палетних стелажів. Ці конструкції оптимально пристосовані до мінімально можливого розміру займаної ними корисної площі приміщення, а також забезпечення зручного доступу до товарів, що зберігаються. Необхідність розміщення максимального числа вантажів на мінімальній складській території висуває високі вимоги до методів проектування та розрахунку стелажних систем.

Як метод дослідження пропонується скінчено-елементний підхід, що дозволяє повною мірою врахувати всі конструктивні особливості складових елементів та характер їх з'єднання у розбірній структурі.

Метою роботи є розробка розрахункової схеми секції палетного збірно-розбірного стелажу для аналізу стійкості, що враховує конструктивні особливості складових елементів стелажу та особливостей роз'ємних з'єднань пружних елементів. Крім цього, скінчено-елементна модель стелажу повинна мати таку розмірність, яка з одного боку забезпечить прийнятну точність розрахунків, а з іншого - дозволить її використовувати як вихідну для побудови моделей багатосекційних стелажів і не вимагатиме під час проведення розрахунків значних комп'ютерних ресурсів обчислювальної системи. .

На основі порівняння стійкості побудованих точної оболонкової моделі секції палетного стелажу та спрощеної комбінованої моделі доведено ефективність використання запропонованої системи спрощень. В результаті побудовано спрощену розрахункову схему секції стелажу, яка може бути використана для побудови розрахункових схем багатосекційних конструкцій.

Ключові слова: палетний стелаж, перфорована оболонка, розрахункова схема, стійкість, метод скінченних елементів, комп'ютерне моделювання.

Reznichenko O. I., Rubashka V. P. "Construction of a calculation scheme for analyzing the stability of collapsible pallet racks".

This article is devoted to the development of methods for analyzing the stability of collapsible pallet racks. These structures are optimally adapted to the minimum possible size of the useful area of the room occupied by them, as well as providing convenient access to stored goods. The need to place the maximum number of goods in the minimum warehouse area increases the demand for the methods of design and calculation of shelving systems.

As a research method, a finite element approach is proposed, which allows taking into account all the design features of the constituent elements and the nature of their connections in a collapsible structure.

The purpose of the work is to develop a design scheme of a pallet collapsible rack section for stability analysis, taking into account the design features of the components of the rack and the features of the detachable joints of the components of the elastic elements. In addition, the finite element model of the rack must have such a dimension that, on the one hand, will ensure acceptable accuracy of calculations, and, on the other hand, will allow it to be used as a starting point for building models of multi-section racks and will not require significant computer resources of the computing system during calculations.

Based on a comparison of the stability of the constructed exact shell model of the pallet rack section and the simplified combined model, the effectiveness of using the proposed system of simplifications is proved. As a result, a simplified design scheme of the rack section has been constructed, which can be used for building design schemes of multi-section structures.

Keywords: pallet rack, perforated shell, calculation scheme, stability, finite element method, computer modeling.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Найбільш поширеним способом зберігання великих обсягів промислових вантажів є їх складування в рядних палетних стелажах. Вантаж при цьому укладають на піддони (палети) двох основних типорозмірів – EUR (800x1200x150 мм, європіддон) та FIN (1000x1200x150 мм, фінський піддон). Подібним способом можна зберігати і важкі штучні вантажі.

На палетних стелажах можливе зберігання вантажів у два, три і більше рівнів (до восьми), включаючи рівень підлоги. Їх застосування дозволяє суттєво скоротити витрати на зберігання одиниці продукції, ефективно використовуючи корисну площу складу (коефіцієнт використання площі складу за умови його правильного проектування може досягати 0,6).

Конструкція стелажів дозволяє встановлювати одинарні та здвоєні ряди, довжина яких обмежується лише зручністю обслуговування вантажною технікою. До недавнього часу використовувалися стелажі цільнозварні або стелажі зі звареними рамами та складанням на болтах, а їх елементами служив звичайний будівельний сортамент металопрокату. Ці стелажі відрізняються винятковою міцністю та надійністю, економією на матеріалі до 50 % від вартості готового розбірного стелажа, що легко компенсується при його монтажі. Фактично такі стелажі слід збирати раз і назавжди, але подібне обладнання не відповідає сучасним вимогам споживача.

Сучасні стелажі обов'язково мають бути швидкозбірними, складатися зі збірних рам та легкого прокату спеціального виду. Для їхнього виробництва зазвичай застосовують спеціальне прокатне обладнання. Стійка сучасного стелажа виконується з металу завтовшки 1,5...2 мм, а різні параметри вантажопідйомності рівнів стелажу забезпечуються відповідно балками спеціальної форми, які виготовляють на прокатному устаткуванні.

Збірно-розбірний стелаж складається з наступних елементів (рис. 1):

- кількох рам кожна з яких має дві вертикальні стійки спеціального профілю з перфорацією, з'єднаних між собою розкосами, що підвищують жорсткість конструкції;
- горизонтальні вантажні балки з елементами кріплення до вертикальних рам які виконані у вигляді кронштейнів з зачепами, привареними до кінців балок;
- під'ятників, розташованих унизу кожної стійки.

Профіль стійки має складну конструкцію, що має у своєму перерізі до 12 ребер жорсткості. Приклад фрагмента стійки та різних видів поперечних перерізів представлений на рис. 2.

Вантажні балки та розкоси являють собою тонкостінні оболонкові конструкції закритого профілю. Балки кріпляться до стійок стелажу за допомогою кронштейнів. Конструкція кронштейна передбачає наявність кількох зачепів, за допомогою яких балка з'єднується зі стійкою стелажу (рис. 3). Розкоси мають на кінцях круглі отвори для кріплення до стійок.

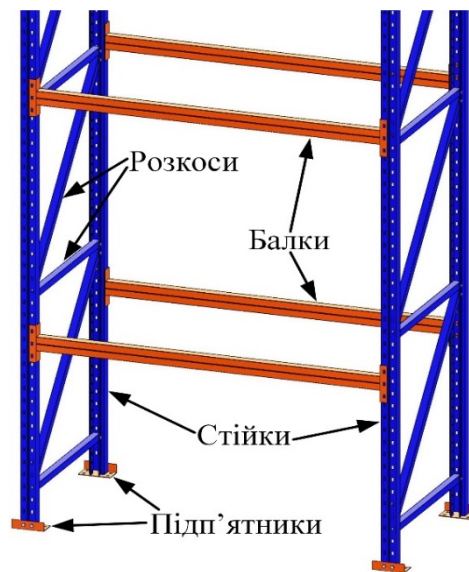


Рис. 1 – Збірно-розбірний палетний стелаж

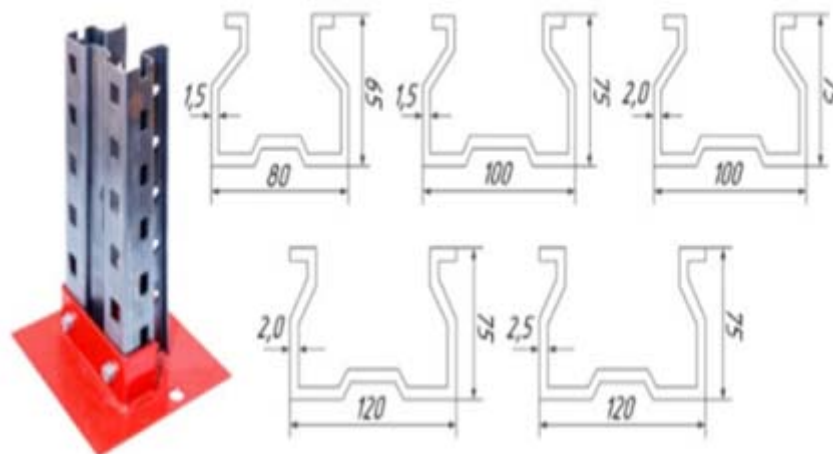


Рис. 2 – Стійка стелажу



Рис. 3 – Балка із кронштейном

Як видно з наведеного опису сучасні палетні стелажі є складними просторовими металевими конструкціями, що складаються з різноманітних пружних оболонкових елементів і знаходяться під впливом просторової системи сил. Оскільки стелажи схильні до значних вертикальних навантажень, особливої актуальності набувають питання забезпечення стійкості як складових елементів, так і всієї конструкції в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукових досліджень, присвячених аналізу стійкості стелажних конструкцій нині практично немає. При розрахунках використовується методика, викладена нормативних документах, прийнятих нашої країні [1-3]. Однак ця методика не дає відповіді на найважливіші питання вдосконалення конструкції під час проектування стелажних систем.

Основу стелажної конструкції складають елементи з тонкостінних перфорованих профілів. Аналіз напружено-деформованого стану та стійкості таких конструкцій значно ускладнений і традиційними аналітичними методами практично неможливий. Тому дослідження обмежуються зазвичай аналізом окремих елементів, що становлять основу стелажних конструкцій.

Основний напрямок досліджень присвячено дослідженню стійкості найскладнішого елемента конструкції стелажу – опорної стійки. Можна виділити два напрями досліджень залежно від виду моделі, яка застосовується для аналізу стійкості.

Перший напрямок пов'язаний з поданням стійки тонкостінним стрижневим елементом відкритого поперечного перерізу. Стійкість таких стрижнів нині є класичним завданням [4, 5]. Але практичне використання таких стрижнів веде до виявлення нових особливостей, які необхідно враховувати в розрахунках. Наприклад, у роботах [6,7] розглянуто питання стійкості стрижнів відкритого профілю з урахуванням геометричних недосконалостей. Робота [8] присвячена аналізу поведінки тонкостінних стрижнів відкритого профілю у вузлах їхнього з'єднання. Автором запропоновано метод формування спеціальних типових матриць жорсткості для різних видів вузлових з'єднань, що має служити основою побудови моделі всієї металоконструкції.

Аналіз сучасних робіт показує, що уявлення опорної стійки стелажу тонкостінним стрижневим елементом дозволяє врахувати особливості стійкості елементів із незамкненим поперечним перерізом. Однак залишається відкритим питання про врахування перфораційних отворів, які використовуються для з'єднання стійки з іншими елементами стелажу – розкосами та вантажними балками.

Тому активно розвивається другий напрямок, який заснований на поданні стійки стелажу тонкостінною оболонкою з перфораційними отворами. У роботах [9,10] на основі великої кількості експериментальних досліджень оцінено вплив круглих, а в монографії [11] круглих та прямокутних отворів на стійкість оболонки. Авторами визначено явну залежність критичного навантаження, що викликає втрату стійкості, від форми та кількості отворів. Такого висновку приходять автор роботи [12]. На основі теоретичних досліджень сильно перфорованих оболонок їм було отримано коефіцієнти зниження жорсткості, спричиненої перфорацією. В результаті визначено значення критичних тисків та відповідні їм форми втрати стійкості залежно від довжини оболонки та ступеня перфорації.

З проведеного аналізу сучасних робіт із стійкості оболонок випливає, що перфораційні отвори, що є характерною особливістю конструкції стійки стелажу, істотно впливають на стійкість цього елемента. Тому для побудови коректної моделі стелажу необхідне переставлення стійок у вигляді тонкостінних перфорованих оболонок. Така модель автоматично забезпечить облік ефекту відкритого поперечного перерізу стійки. Це ж стосується і таких важливих елементів конструкції як кронштейни та підп'ятники стелажу. Для моделювання інших елементів металоконструкції стелажу можуть бути використані стрижневі елементи.

Слід зазначити, що наведені роботи присвячені дослідженню стійкості окремих елементів металоконструкції стелажу. У той же час практично немає робіт, присвячених аналізу стійкості всієї конструкції збірно-розбірної стелажу з урахуванням конструктивних особливостей кожного елемента та специфіки зав'язків між ними. Враховуючи складність такої задачі, методом її вирішення пропонується метод чисельного моделювання стійкості на основі скінчено-елементних розрахункових схем, який знайшов широке застосування у вирішенні різноманітних задач, у тому числі й при аналізі стійкості пружних систем [13-15].

Мета роботи

Розробити розрахункову схему секції палетного збірно-розбірної стелажу для аналізу стійкості, що враховує:

- конструктивні особливості складових елементів стелажу;
- особливостей роз'ємних з'єднань стійок, розкосів, балок

Крім цього, скінчено-елементна модель секції стелажу повинна мати таку розмірність, яка з одного боку забезпечить прийнятну точність розрахунків, а з іншого боку - дозволить її використовувати як вихідну для побудови моделей багатосекційних стелажів і не вимагатиме при проведенні розрахунків значних комп'ютерних ресурсів обчислювальної системи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Конструкція палетного стелажу має низку особливостей, які істотно впливають на технологію проектування та розрахунок таких систем.

По-перше, всі елементи стелажної системи виконані з тонкостінного гнутого профілю. Товщини становлять 1,5 – 2,5 мм. Особливу складність викликають стійки стелажу, оскільки вони виконані з гнутого тонкостінного відкритого профілю. Балки та розкоси зазвичай виконуються з гнутих тонкостінних профілів замкнутого поперечного перерізу.

По-друге, такі стелажи є збірно-розбірними. Отже, всі елементи пов'язані один з одним роз'ємними видами зв'язків - болтові з'єднання, з'єднання типу «зачіп» та ін.

По-третє, стелажи мають значну висоту (до 30 м) і довжина по фронту визначається розмірами складу і може досягати значних величин по фронту від 10м до 40 м. У той же час такі конструкції повинні витримувати значні навантаження. Усі ці особливості значно ускладнюють розрахунок.

Відповідно до нормативних документів [1-3] особлива увага приділяється розрахункам на стійкість, оскільки високі тонкостінні конструкції стелажів знаходяться під впливом значних вертикальних навантажень. У ДСТУ EN 15512:2015 передбачено стрижневу (балочну модель) стелажу [2]. Хоча не забороняється використання комп'ютерних методів та використання інших видів моделей. У свою чергу застосування стрижневої (балочної) моделі вимагає обґрунтування побудови балочних моделей основних складових металоконструкції стелажу – балки (траверси) з кронштейном, розкосів та стійок, підп'ятників.

Вантажні балки і розкоси є коробчастими тонкостінними елементами замкнутого постійного по довжині перерізу. Тому вони повністю підходять під поняття балка, кронштейни та підп'ятники моделюється елементом з кутовими жорсткостями. Але зі стійками справа значно складніша.

Стійка див. рис. 2 являє собою перфоровану тонкостінну оболонку складної форми. Стійка є центральним елементом стелажу що пов'язує всі основні елементи в єдину конструкцію. Стійки сприймають навантаження та через них навантаження передається на основу. Цим визначається конструкція стійки. Перфораційні отвори призначені для з'єднання кронштейна балки та розкосів. Така конструкція стійки ускладнює її уявлення балочним елементом або робить це уявлення неможливим, а необхідність обліку перфораційних отворів значно змінюють (зменшують) жорсткі параметри всієї стійки в цілому,

Збірно-розбірний характер конструкції викликає необхідність урахування конструктивних особливостей сполучних елементів:

- кронштейни, які за допомогою зачепів з'єднують балки стелажу зі стійками,
- болтові з'єднання, за допомогою яких розкоси пов'язують стійки в рамі стелажу.

Тому пропонується побудувати модель секції стелажу, де буде використана комбінована розрахункова схема в якій вантажні балки та розкоси мають бути представлені балочними моделями, стійки, кронштейни – пружними оболонками, кріпильні деталі – тривимірними тілами

Сучасні САПР дають можливість будувати геометричні моделі та розраховувати найскладніші конструкції. Моделювання стелажної конструкції виконуватимемо в САПР SOLIDWORKS. Ця система має найширші можливості геометричного моделювання різних конструкцій, врахуванню їх особливостей і різноманітності з'єднань. Крім цього, у цій системі передбачено можливість проведення різноманітних розрахунків, у тому числі розрахунків стійкості.

Як приклад, задавалася секція стелажу з наступними параметрами:

Висота стелажу 6 м, стелаж має 5 ярусів (включаючи підлогу). Глибина стелажу 1 м. Висота ярусу 1,1 м. У осередку може розташовуватися два європіддони з вантажем 500 кг на кожному піддоні. Розміри стойки 80x80. Балки – 50x90, довжина 1800 мм (під два європіддони). Розкіс – елемент прямокутного перерізу зі стороною 40 мм. Товщина металу усіх елементів 1,5мм. Кріпильні вироби – болти M10x55, гайки M10

На рис. 4 представлено розроблені 3-D моделі опорної стійки, балки з кронштейном та розкоси палетного стелажу.

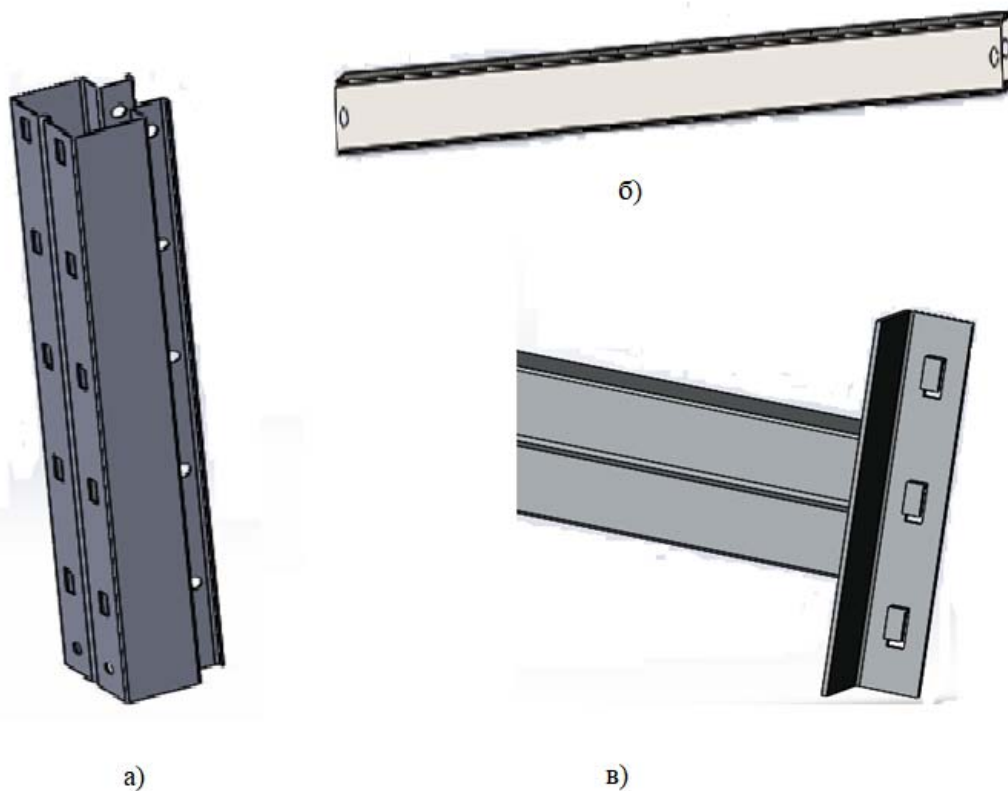


Рис. 4 – 3-D моделі елементів стелажу. а) – стійка; б) – розкіс; в) – балка з кронштейном

Як видно з наведеного малюнка, модель стійки являє собою довгу тонкостінну оболонку складного поперечного перерізу розімкнутого профілю. На фронтальній грані по всій висоті стійки передбачено ребро жорсткості, що підвищує її жорсткість, а також прямокутні перфораційні отвори для її з'єднання з вантажними балками стелажу за допомогою зачепів кронштейнів. На тильній стороні оболонки передбачено кілька ребер жорсткості, а також круглі перфораційні отвори для з'єднання стійки з розкосами за допомогою болтових з'єднань. У перерізі з тильного боку також передбачений роз'єм, до якого заводиться розкіс при з'єднанні стійок в єдину раму стелажу.

Розкіс являє собою подовжену тонкостінну оболонку постійного квадратного поперечного перерізу. На кінцях розкосу передбачені отвори для болтових з'єднань розкісу зі стійкою.

Балка моделюється замкнутою тонкостінною оболонкою з ребром жорсткості посередині. На кінці прикріплений кронштейн який є кутовою оболонкою з видавленими на одній зі сторін зачепами. За допомогою цих зачепів балка прикріплюється до сусідніх стояків стелажу.

Крім цього, при моделюванні секції стелажу використовувалися 3-D моделі кріпильних деталей – болтів та гайок, які використовувалися при моделюванні болтових з'єднань розкосів зі стійками рами. Таким чином, розроблена 3-D модель повністю підготовлена для реалізації всіх видів роз'ємних з'єднань, які використовуються в збірно-розбірних палетних стелажах.

3-D модель секції стелажу представлена на рис. 5. Вона складається із 2-х рам, пов'язаних між собою за допомогою кронштейнів з вантажними балками. У середині кожної рами стійки з'єднуються горизонтальними та кутовими розкосами. Кінці розкосів заведені у прорізи стійок і зафіксовані болтовими з'єднаннями. Моделювання роз'ємних з'єднань показано на рис. 3.5.

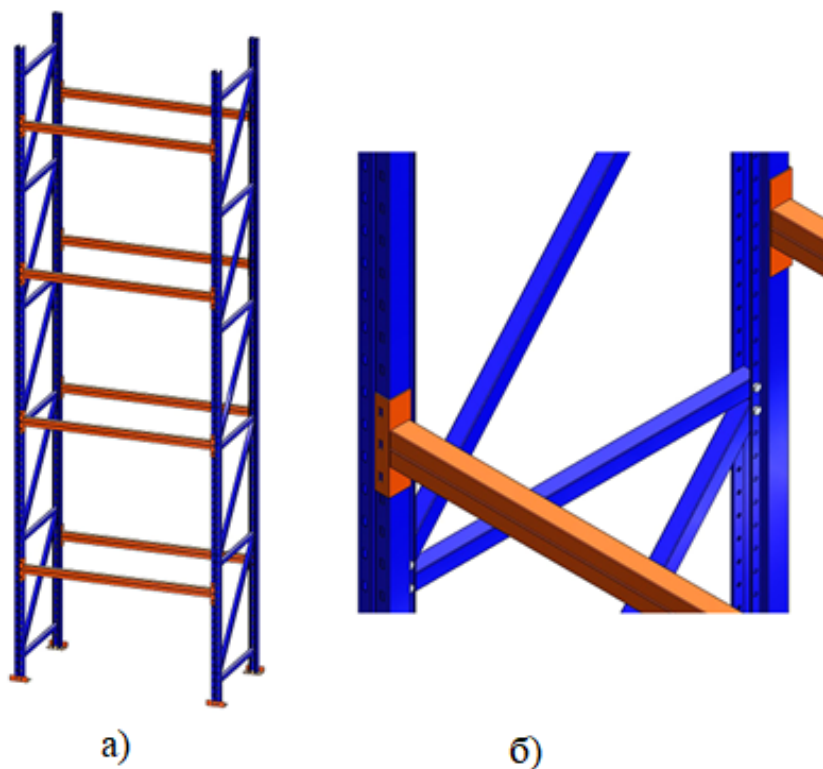


Рис. 5 – Модель секції стелажу. а) загальний вигляд секції стелажу; б) моделювання болтових з'єднань та з'єднань «зачепом»

У результаті отримано 3-D модель секції стелажу, яка максимально відповідає реальній конструкції.

На основі побудованої моделі стелажу у додатку SOLIDWORKS SYMULATION побудовано розрахункову схему для аналізу стійкості. Врахування роз'ємних з'єднань проводилося наступним чином:

- болтові з'єднання розкосів зі стійками моделювалися з'єднаннями типу «штифт», що моделює вільний поворот кінця розкоса щодо болта, який з'єднує розкіс зі стійкою.
- взаємодія зачепів кронштейна зі стійкою моделювалася шляхом завдання жорстких зв'язків граней зачепів з гранями стійки, що контактують.

Грані балки зв'язувалися жорсткими зв'язками із відповідними гранями кронштейнів. Вид спирання стійок задавалася «зафіксована геометрія», що забезпечує жорсткий зв'язок нижнього перерізу кожної стійки з основою. Навантаження, що діють на стелаж, задавалися з умови розташування в кожному осередку двох палет по 500 кг.

Для проведення розрахунку було сформовано скінчено-елементну сітку з такими характеристиками: розміри елемента: min 10 мм; max 213 мм; загальна кількість ступенів свободи становила 8 127 336.

При розрахунку визначалися коефіцієнт запасу стійкості (коефіцієнт навантаження у термінах SOLIDWORKS) секції стелажу та перша форма втрати стійкості. Результати аналізу стійкості та характеристики сітки представлені на рис. 6. Як видно з наведеного малюнка, першою формою втрати стійкості є згинальна форма загальної втрати стійкості. Коефіцієнт запасу стійкості дорівнює 7,25.

Цей результат отримано при максимальному наближенні розрахункової схеми до реальної конструкції - всі елементи моделювалися пружними оболонками, кріпильні деталі - пружними 3-мірними тілами. Враховувалися також болтові з'єднання розкосів та з'єднання кронштейнів вантажних балок із стійками.

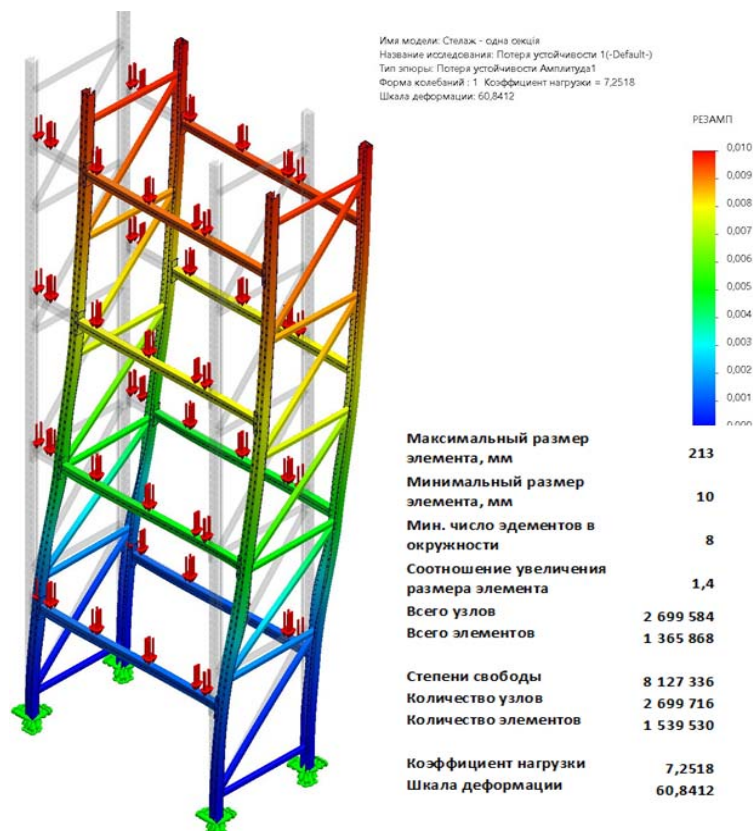


Рис. 6 – Результати розрахунку стійкості вихідної оболонкової моделі секції стелажу

Така точна розрахункова схема, з іншого боку, під час вирішення вимагала серйозних ресурсів комп'ютера. Розмірність завдання становила понад 8 млн. рівнянь – за ступенем свободи. Якщо таку розрахункову схему використовуватиме при побудові моделі багатосекційного стелажу, це призведе до завдань дуже великої розмірності що в свою чергу призведе до серйозних обчислювальних труднощів. Тому актуальним стає спрощення розрахункової схеми з метою зниження розмірності завдання. Причому спрощення має бути виконане таким чином, щоб воно не суттєво позначилося на точності результатів розрахунку. Таким чином, необхідно перейти до побудови спрощеної розрахункової схеми секції стелажу.

Напрямом спрощення побудованої розрахункової схеми пропонується заміна деталей кріплення абсолютно жорсткими тілами. Дійсно, пружні властивості болтів і гайок навряд чи істотно впливають на пружні властивості всієї системи.

Наступне припущення полягає у поданні розкосів та балок спрощеними балочними елементами. Таку заміну можна зробити оскільки ці елементи повністю відповідають критеріям балкового елемента: постійне по довжині поперечний переріз, довжина елемента більш ніж у 10 разів перевищує найбільший розмір поперечного перерізу.

Для моделювання балкових елементів у SOLIDWORKS SYMULATION всім розкосам та балкам було присвоєно властивість «Розглядати як балку». При заміні розкосів балочними елементами у вузлах на кінцях були задані шарнірні з'єднання що моделюють болтові з'єднання в реальному стелажі. Вузли на кінцях балок жорстко пов'язані з відповідними гранями кронштейнів. Зв'язки 3-D моделей кронштейнів із гранями оболонки стійки не змінювалися. Перед розрахунком була сформована скінчено-елементна сітка з тими самими параметрами, що у перших двох випадках. Результати розрахунку такого варіанта спрощення представлені на рис. 7. Результати розрахунків зведемо в таблицю 1.

Таблиця 1 - Результати розрахунків для перших двох схем спрощення

Оцінюваний параметр	Первинна модель	Спрощена розрахункова схема
1-ша форма втрати стійкості	згинальна	згинальна
Коефіцієнт запасу зі стійкості	7,25	7,77
Число ступенів свободи	8 127 336	4 417 092

Якщо порівнювати початковий варіант та останній результат розрахунків отримуємо, що введена система спрощень призвела до незначного збільшення коефіцієнта стійкості з 7,25 до 7,77. (Збільшення на 7%) але з іншого боку такі спрощення призвели до зменшення розмірності завдання майже вдвічі. Проте розмірність завдання залишається поки що досить високою. Наприклад, якщо цю розрахункову схему використовувати як базову для побудови схеми 5-ти секційного стелажу, то в ньому братиме участь 3 таких секції, а отже, розмірність завдання складе понад 13 млн. ступенів свободи. Чисельний розрахунок завдання такої розмірності може спричинити серйозні труднощі.

Тому наступним напрямом у побудові ефективної розрахункової схеми є вибір параметрів скінчено-елементної сітки, яка забезпечить прийнятну розмірність задачі та точність результатів.

Відомо, що під час проведення розрахунків з використанням скінчено-елементних схем результат розрахунку багато в чому визначається якістю сітки. Чим дрібніша сітка, тим точніше модель апроксимує реальну конструкцію, а отже, і точніше результат. Але з іншого

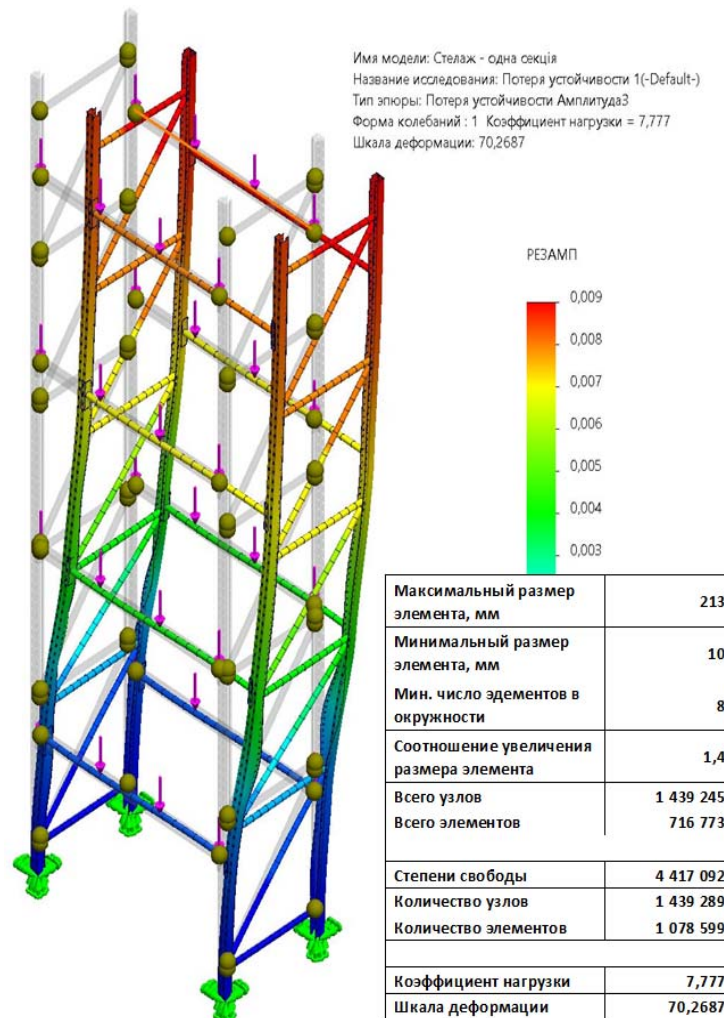


Рис. 7 – Результати розрахунків при поданні розкосів та вантажних балок спрощеними балочними елементами

боку зменшення величини кінцевих елементів призводить до збільшення ступенів свободи розрахункової скінчено-елементної схеми а, отже, і збільшення розмірності завдання що у свою чергу може призвести до серйозних обчислювальних труднощів. Тому при виборі розмірів сітки необхідно шукати розумний компроміс між точністю моделювання реальної системи та точністю отримуваних результатів.

При аналізі стійкості секції стелажу та реалізації спрощення розмір сітки залишався незмінним. Це дозволило провести коректне порівняння одержуваних результатів. Тепер для зниження розмірності завдання проведемо такі дослідження. Для останньої отриманої розрахункової схеми, в якій розкоси та балки представлені спрощеними балочними елементами, а кріпильні деталі – абсолютно жорсткими тілами, проведемо розрахунки за різних розмірів скінчено-елементної сітки.

З цією метою при формуванні сітки змінювався показник щільності сітки. У результаті були побудовані дві спрощені схеми з різними сітками:

1. спрощена схема №1 з розмірами скінченого елемента (min|max, мм) 18/90, які забезпечили 2 060 868 ступенів свободи

2. спрощена схема №2 з розмірами скінченого елемента (min|max, мм) 21/106 з 1 820 598 ступенями свободи

Результати розрахунків стійкості секції стелажу для різних параметрів сітки для спрощеної моделі наведені в таблиці 2. В останньому стовпці цієї таблиці наведені отримані раніше розрахункові дані первинної неспрощеної моделі.

Таблиця 2 - Результати розрахунків за різної щільності сітки

Оцінюваний параметр	Спрощена розрахункова схема			Первинна (неспрощена) розрахункова схема
	Початкова щільність сітки	Розрахункова схема №1	Розрахункова схема №2	
Розмір кінцевого елемента min/max, мм	10/213	18/90	21/106	10/213
Число ступенів свободи	4 417 092	2 060 868	1 820 598	8 127 336
1-ша форма втрати стійкості	згинальна	згинальна	згинальна	згинальна
Коефіцієнт запасу зі стійкості	7,77	8,11	8,31	7,25

Висновки

У цій роботі побудовано уточнену 3-D модель металоконструкції секції збірно-розбірної палетного стелажу що максимально наближена до реальної конструкції. Всі елементи металоконструкції представлені оболонковими тонкостінними моделями, кріпильні деталі, що беруть участь у болтових з'єднаннях, моделюються пружними 3-х мірними тілами. Проведений розрахунок стійкості дозволив визначити коефіцієнт запасу стійкості, який при заданій схемі навантаження склав 7,25. Однак такий розрахунок зажадав значних ресурсів обчислювальної системи. Достатньо відзначити, що розмірність скінчено-елементної сітки склала 8 127 336 ступенів свободи. Така розмірність неприйнятна у разі використання такої розрахункової схеми як базової для побудови розрахункової схеми багатосекційного стелажу.

В результаті проведених досліджень запропоновано спрощену розрахункову схему секції збірно-розбірної палетного стелажу. Ця схема враховує всі конструктивні особливості складових елементів металоконструкції стелажу та характер збірно-розбірних з'єднань, за допомогою яких ці елементи пов'язані один з одним. У ній реалізована система спрощень, яка полягає в тому, що деталі кріплення представлені абсолютно жорсткими тілами, а розкоси і вантажні балки представлені спрощеними балочними елементами. Опорні стійки та кронштейни моделюються просторовими тонкостінними оболонками.

Для зменшення розмірності скінчено-елементної схеми було вивчено вплив щільності сітки на розрахунки стійкості секції стелажу. В результаті на основі спрощеної розрахункової схеми були побудовані дві схеми з різною щільністю сітки. Розрахункова схема №1 з розмірністю 2 060 868 ступенів свободи і розрахункова схема №2 з більш грубою сіткою дає 1 820 598 ступенів свободи.

Порівняння спрощеної розрахункової схеми з різними скінчено-елементними сітками з первинною (неспрощеною моделлю) призводить до таких висновків.

Спрощена розрахункова схема №1 призводить до зміни визначення коефіцієнта стійкості з 7,25 у вихідній не спрощеній моделі до 8,11 у спрощеній. Таким чином, розрахункова схема з такими параметрами сітки призводить до помилки у визначенні коефіцієнта стійкості в 11%.

Спрощена розрахункова схема №2 з сіткою з 1 820 598 ступенів свободи призводить до зміни у визначенні коефіцієнта стійкості з 7,25 у вихідної не спрощеної моделі до 8,31 у спрощеної. Помилка у визначенні коефіцієнта стійкості у цьому разі становить 15%.

Спільним для обох цих спрощених схем є те, що розмірність завдання визначення стійкості обох схем майже 4 рази менше розмірності первинної задачі. Помилка визначення коефіцієнта стійкості становить від 11% до 15%. Цих даних достатньо для прийняття рішення про вибір найбільш ефективної розрахункової схеми, яку можна використовувати для побудови схеми багатосекційного стелажу.

Залежно від постановки завдання можна вибирати ту чи іншу розрахункову схему. Якщо ставиться завдання визначення стійкості багатосекційного стелажу, найкраще за основу прийняти розрахункову схему №1. Її використання призведе не тільки до побудови підсумкової розрахункової схеми з прийнятною розмірністю, але й результат, який буде отримано, буде з достатньою для практичної мети точністю.

Якщо ставиться завдання якісної оцінки впливу тих чи інших параметрів на стійкість багатосекційного стелажу, краще розрахункова схема №2 з грубішою сіткою. Розрахункова схема багатосекційного стелажу у разі буде побудована з меншим числом ступенів свободи, а точність у визначенні параметрів щодо якісних досліджень не є такою критичною.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ EN 15620:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Допуски, деформації та зазори. – [Чинний від 2015–11–01]. – Київ : УкрНДНЦ, 2015. – 77 с.
2. ДСТУ EN 15512:2015. Системи складські стаціонарні сталеві. Збірно-розбірні палетні стелажні системи. Принципи проектування конструкцій. – [Чинний від 2015–11–01]. – Київ : УкрНДНЦ, 2015. – 140 с.
3. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-3. Загальні положення. Додаткові правила для холоднодеформованих елементів та пластин. – [Чинний від 2013–07–01]. – Київ : УкрНДПроектстальконструкція, 2012. – 22 с.
4. Юрченко В. В. Несуча здатність стержневих елементів конструкцій із холодногнутих профілів / В. В. Юрченко, А. В. Перельмутер. – Київ : Каравела, 2020. – 310 с.
5. Бритвин Е. И. К расчету рамных конструкций, составленных из тонкостенных стержневых элементов / Е. И. Бритвин // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 4. – С. 43–54.
6. Okhten I. O. Analysis of the loss of stability of open profile thin-walled rods, into account the imperfections of the form / I. O. Okhten, O. O. Lukianchenko // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2022. – Iss. 108. – P. 360–368.
7. Okhten I. O. Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile / I. O. Okhten, O. O. Lukianchenko // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 106. – P. 122–128.
8. Perelmuter A. V. To the calculation of steel structures from thin-walled rods / A. V. Perelmuter // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 108. – P. 119–130.
9. Дзюба А. П. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек, ослабленных круговыми отверстиями при кручении / А. П. Дзюба, Е. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба // *Проблемы прочности*. – 2017. – № 6. – С. 111–121.
10. Дзюба А. П. Экспериментальные исследования устойчивости ослабленных круговыми отверстиями цилиндрических оболочек при осевом сжатии / А. П. Дзюба // *Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций : сб. науч. трудов*. – 2020. – Вып. 32. – С. 23–49.
11. Дзюба А. П. Несуча здатність циліндричних оболонок з отворами / А. П. Дзюба, Є. Ф. Прокопало, П. А. Дзюба. – Дніпропетровськ : Ліра, 2014. – 224 с.
12. Numerical modelling of perforated shells stability / A. A. Antipov [et al.] // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2015. – № 1. – P. 21–30.
13. Convergence of the finite element method and the semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters / V. A. Bazhenov [et al.] // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2021. – Iss. 106. – P. 92–104.
14. Лук'янченко О. О Комп'ютерне моделювання в задачах стійкості тонкостінних стержнів відкритого профілю з недосконаlostями форми / О. О. Лук'янченко, І. О. Охтен // *Управління розвитком складних систем*. – 2021. – № 47. – С. 95–101.
15. Bilyk S. I. Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software / S. I. Bilyk, O. Y. Bashynska, O. V. Bashynskiy // *Strength of Materials and Theory of Structures*. – 2022. – Iss. 108. – P. 189–202.

References

1. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2015, *DSTU EN 15620:2015 Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Dopusky, deformatsii ta zazory*, Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti, Kyiv.
2. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti 2015, *DSTU EN 15512:2015 Systemy skladski statsionarni stalevi. Zbirno-rozbirni paletni stelazhni systemy. Pryntsyp yproektuvannia konstruktsii*, Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti, Kyiv.
3. Ukrainskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruktsii 2006, *DSTU EN -NB EN 1993-1-3:2012 Yevrokod 3. Proektuvannia stalevykh konstruktsii. Chastyna 1-3. Zahalni polozhennia. Dodatkovy pravyla dlia kholodnodeformovanykh elementiv ta plastyn* [EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3: Design steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting], Ukrainskyi naukovo-doslidnyi ta proektnyi instytut stalevykh konstruktsii, Kyiv.
4. Yurchenko, VV & Perelmutter, AV 2020, *Nesucha zdatnist sterzhnevyykh elementiv konstruktsii iz kholodnohnutykh profiliv*, Karavela, Kyiv.
5. Brytvyn, EY 2016, 'K raschetu ramnykh konstruktsiy, sostavlennykh iz tonkostennykh sterzhnevyykh elementov', *Stroytelnaia mekhanika i raschet sooruzheniy*, no. 4, pp. 43-54.
6. Okhten, IO & Lukianchenko, OO 2022, 'Analysis of the loss of stability of open profile thin-walled rods, into account the imperfections of the form', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 360-368.
7. Okhten, IO & Lukianchenko, OO 2021, 'Some aspects of consideration of initial imperfections in the calculations of stability of thin-walled elements of open profile', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 106, pp. 122-128.
8. Perelmutter, AV 2021, 'To the calculation of steel structures from thin-walled rods', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 119-130.
9. Dziuba, AP, Prokopalo, EF & Dziuba, PA 2017, 'Eksperimentalnoye issledovaniye ustoychivosti tsilindricheskikh obolochek, oslablennykh krugovymi otverstiyami pri kruchenii', *Problemy prochnosti*, no. 6, pp. 111-121.
10. Dziuba, AP 2020, 'Eksperimentalnyye issledovaniya ustoychivosti oslablennykh krugovymi otverstiyami tsilindricheskikh obolochek pri osevom szhatii', *Problemy vychislitelnoy mekhaniki i prochnosti konstruktsiy*, iss. 32, pp. 23-49.
11. Dziuba, AP, Prokopalo, YeF & Dziuba, PA 2014, *Nesucha zdatnist tsylindrychnykh obolonok z otvoramy*, Lira, Dnipropetrovsk.
12. Antipov, AA, Artemyeva, AA, Bazhenov, VG, Zhestkov, MN & Kibec, AI 2015, 'Numerical modelling of perforated shells stability', *PNRPU Mechanics Bulletin*, no. 1, pp. 21-30.
13. Bazhenov, VA, Horbach, MV, Martyniuk, IYu & Maksimyyuk, OV 2021, 'Convergence of the finite element method and the semi-analytical finite element method for prismatic bodies with variable physical and geometric parameters', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 106, pp. 92-104.
14. Lukianchenko, OO & Okhten, IO 2021, 'Kompiuterne modeliuvannia v zadachakh stiikosti tonkostinnykh sterzhniv vid krytoho profilu z nedoskonalostiamy formy', *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*, no. 47, pp. 95-101.
15. Bilyk, SI, Bashynska, OY & Bashynskiy, OV 2022, 'Determination of changes in thermal stress state of steel beams in LIRA-SAPR software', *Strength of Materials and Theory of Structures*, iss. 108, pp. 189-202.

Стаття надійшла до редакції 24 січня 2023 року

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ОПОРУ ПЕРЕМІЩЕННЯ В ҐРУНТІ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ НОЖОВОГО ТРУБОЗАГЛИБЛЮВАЧА

© Супонєв В.М., Рагулін В.М., Розенфельд М.В.

Харківський національний автомобільний-дорожній університет

Інформація про авторів:

Супонєв Володимир Миколайович: ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7404-6691>; v-suponev@ukr.net, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Рагулін Віталій Миколайович: ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2083-4937>; ragulinrvn@ukr.net, тел.: +38-050-545-80-70; кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Розенфельд Микола Володимирович: ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6397-7319>, kr426571@gmail.com, тел.: +38-068-618-05-84; асистент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова; Харківський національний автомобільно-дорожній університет; вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Одним з найбільш ефективних способів прокладання підземних трубопроводів є метод заглиблення, коли за допомогою плужно-ножового робочого органу та трубоукладального обладнання труба опускається в ґрунт на потрібну відмітку без утворення траншеї, а, відповідно, і без її засипання та рекультивації родючого шару ґрунту. Особливістю процесу є великий опір під час глибокого різання ґрунту ножовим робочим органом, що вимагає значних тяглових зусиль від базової машини. Витрати на переміщення трубоукладального обладнання, яке призначене на укладання трубопроводу на визначену глибину вимагають додаткових зусиль, які треба враховувати. Також слід враховувати конструкційні розміри укладального обладнання, яке визначається величиною прогину трубопроводу та його жорсткістю.

В роботі пропонується методика розрахунку конструктивних та технологічних параметрів обладнання для прокладання розподільних лінійно протяжних трубопроводів, яке відбувається безтраншейним методом шляхом їх заглиблення ножовим трубозаглиблювачем. В розрахунках для визначення сил опору ґрунту враховані, як розміри обладнання, яке визначається жорсткістю труби, що прокладається, так і фізико-механічні властивості ґрунтів, які розробляються. Також вирішується задача по зменшенню розмірів трубоукладального обладнання, а відповідно і сил опору при його переміщенню в ґрунті. Відбувається це скороченням довжини прогину трубопроводного батогу шляхом примусового притиснення труби у межах її допустимого напруження у місті перегину. Зниження сили опору на переміщення трубоукладального обладнання може досягати 40 відсотків. У загальному балансі ця складова складатиме до 10 відсотків.

Результати проведених досліджень можуть бути застосовані при створенні спеціальних машин для безтраншейного прокладання розподільних трубопроводних мереж для постачання води, газу, продуктопроводів та інше.

Ключові слова: розподільні газопроводи, безтраншейна технологія, поліетиленові труби, ножове робоче обладнання, глибоке різання ґрунту.

Suponev V., Ragulin V., Rozenfeld N. "Determining the structural parameters and forces of resistance to movement in the soil of the working equipment of the knife pipe dredger"

One of the most effective methods of laying underground pipelines is the deepening method, when, with the help of a plow-knife working body and pipe-laying equipment, the pipe is lowered into the soil to the required mark without the formation of a trench, and, accordingly, without its filling and reclamation of the fertile soil layer. A feature of the process is the high resistance during deep cutting of the soil by the knife working body, which requires significant traction efforts from the base machine. The costs of moving the pipe-laying equipment, which is designed to lay the pipeline at a certain depth, require additional efforts that must be taken into account. It is also necessary to take into account the structural dimensions of the laying equipment, which is determined by the amount of deflection of the pipeline and its stiffness.

The work proposes a method for calculating the structural and technological parameters of the equipment for laying distribution linearly extended pipelines, which is carried out by the trenchless method by deepening them with a knife pipe sinker. Calculations to determine the resistance forces of the soil take into account both the size of the equipment, which is determined by the rigidity of the pipe being laid, and the physical and mechanical properties of the soils being developed. The task of reducing the size of the pipe-laying equipment and, accordingly, the resistance forces during its movement in the soil is also being solved. This happens by reducing the length of the bend of the pipeline whip by forcibly pressing the pipe within the limits of its permissible stress in the bend. The reduction of resistance to the movement of pipe-laying equipment can reach 40 percent. In the total balance, this component will make up to 10 percent.

The results of the conducted research can be applied in the creation of special machines for trenchless laying of distribution pipeline networks for the supply of water, gas, food pipelines, etc.

Keywords: gas distribution pipelines, trenchless technology, polyethylene pipes, knife working equipment, deep cutting of soil.

Огляд літературних джерел

Сучасний розвиток технологій підземного прокладання інженерних комунікацій базується на активному впровадженні впровадження в даний час поліетиленових труб, які все частіше застосовуються замість сталевих. Особливо це стосується безтраншейних технологій будівництва [1]. Одним з таких є метод заглиблення, який найбільш є ефективніший при прокладанні розподільчих газопроводів, водопроводів, продуктопроводів та інше, які відносяться до міжселищних мереж та мають незначні розміри діаметру труб, які містяться в межах 65-225 мм [2, 3].

Сучасний стан технологій прокладання інженерних мереж та їх удосконалення розглядається в роботах

Ефективність сучасних безтраншейних технологій та їх обчислювання доведена у роботах [4-6].

Тенденціям безтраншейного розвитку технологій та машин для безтраншейного прокладання підземних комунікацій присвячені роботи [7,8].

З проведених попередніх досліджень з прокладання кабельних ліній електричних мереж та зв'язку було встановлено, що найбільші енергетичні витрати при цьому процесі націлені на подолання сил глибокого різання ґрунту ножовим робочим органом [9-12]. Сила опору переміщення обладнання для укладання кабелю у прорізаний ґрунт у загальному обсязі є незначною, та складає менш ніж 3-4 % [13].

Характерною особливістю прокладання трубопроводів є те, що вони мають значні розміри прогину, які визначаються жорсткістю труб, яка в свою чергу визначається її розмірами та механічними властивостями. Відповідно до прогину необхідно потрібно мати

більші розміри трубоукладацького обладнання, яке призначено для підтримки стінок створеної ножовим робочим органом щілини в ґрунті на протязі її опускання до встановленої глибини [14].

Таким чином конструктивні параметри та взаємодія з ґрунтом трубоукладацького обладнання при укладанні жорстких трубопроводів вимагає окремого розгляду з урахуванням специфіки як самої труби, так і вимог до процесу, що пред'являються трасовими умовами: великі лінійно-протяжні ділянки, нерівності рельєфу місцевості, вигини траси та ін.

Мета дослідження

Метою роботи є встановлення конструктивних параметрів та закономірностей взаємодії з ґрунтом трубоукладацького обладнання трубозаглиблювача, який призначений для безтраншейного прокладання міжселищних та розподільних трубопроводів діаметром 75÷225мм методом заглиблювання.

Основна частина

Процес розробки ґрунту при заглибленні трубопроводу складається з двох етапів: різання ґрунту ножовим робочим органом та протягування в ньому трубоукладацького пристрою, який пояснюється рисунком 1.

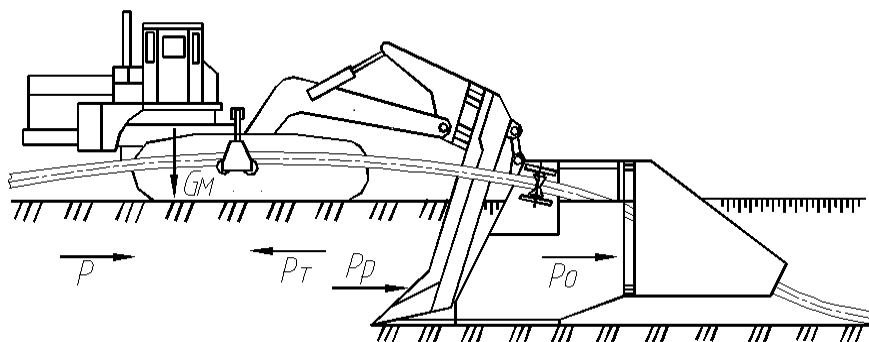


Рис. 1 – Конструктивна схема ножового трубозаглиблювача для безтраншейного прокладання трубопроводів методом їх заглиблювання та дія сил на робоче обладнання машини

Вихідними даними для визначення основних параметрів робочого обладнання трубозаглиблювача відповідно до особливостей процесу його роботи (рис.1) є: діаметр труби, що укладається, величина її заглиблення (під заглибленням труби розуміється відстань від денної поверхні ґрунту до верху труби), фізико-механічні властивості ґрунту.

Для здійснення робочого процесу прокладання газопроводів методом заглиблення необхідно виконання наступної умови:

$$T \geq (G + G_0)(f + i) + P_p + P_0, \quad (1)$$

де G - вага машини;

G_0 - вага робочого устаткування;

f, i - відповідно коефіцієнт опору коченню та величина ухилу;

P_p, P_0 - відповідно зусилля різання ґрунту ножом та зусилля протягування робочого обладнання.

Тягове зусилля машини визначається її вагою та її зчепленням з ґрунтом, та являє собою:

$$T = \psi G_{\text{ц}}, \quad (2)$$

де ψ - коефіцієнт зчеплення рушія з ґрунтом;

$G_{\text{ц}}$ - зчіпна вага машини, для машин з гусеничним рушієм. На основі залежностей (1) та (2) можна записати вираз балансу сил у наступному вигляді

$$(G + G_0)(\psi - f - i) \geq P = P_p + P_0. \quad (3)$$

Ліва частина співвідношення (3) визначає вільне тягове зусилля на гаку машини.

Відповідно до нормативів України [2, 3] поліетиленові газопроводи слід укладати на глибину 0,8м, а водогони повинні заглиблюватися нижче глибини промерзання, яка в деяких регіонах України можуть досягати до 1,4 м. Найбільш поширеним типом ґрунтів можна вважати суглинок II-III категорії міцності [15]. Це умови було покладено в основу подальших розрахунків.

Виходячи з попередніх досліджень та рекомендацій по створенню ножових машин для розрахунків можна прийняти наступні параметри ножа:

α - кут різання, 30 °, град.,

b - ширина ножа,

H - глибина різання.

Ширина ножа визначається розміром щілини необхідною для вільного просування трубоукладального обладнання в ґрунті, яке у свою чергу визначається вільним опусканням трубопроводу, та може бути прийнятою

$$b = b_0 + \delta, \text{ м}, \quad (4)$$

$$b_0 = d + 0,05, \text{ м}, \quad (5)$$

де b_0 - ширина обладнання для заглиблення труби;

δ - зазор між стінками обладнання для заглиблення труби та ущільненими стінками щілини в ґрунті.

Величина зазору відповідає пружній деформації ущільненого ґрунту і відповідно до роботи [3] для умов, що розглядаються, може бути визначена за формулою

$$\delta = 0,055 \cdot 10^{-3} q_K b_0, \text{ м}, \quad (6)$$

де q_K - величина питомого лобового тиску ґрунту за критичною глибиною різання, що дорівнює

$$q_K = 260h + 65,6b_0 + 626, \text{ кПа}; \quad (7)$$

$$h = 0,5(0,8 + d + 2,32b_0), \text{ м}. \quad (8)$$

Глибина різання ґрунту

$$H = 0,8 + d, \text{ м}. \quad (9)$$

Проведеними теоретичними дослідженнями виявлено закономірність сил опору розробки ґрунту за умов укладання розподільних газопроводів діаметрів поліетиленових труб у діапазоні до 225мм у ґрунтах III категорії міцності (рис.2). Обробка методами

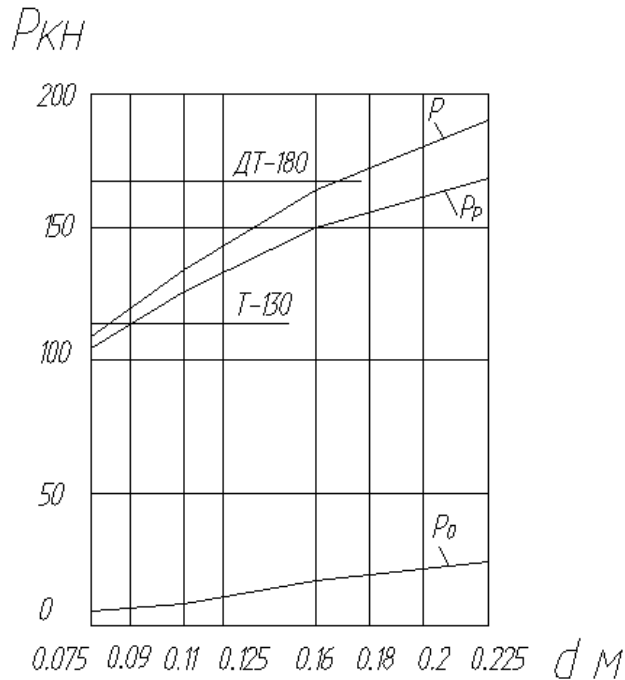


Рис. 2 – Залежності величин опору розробки ґрунту від діаметра труби, що укладається при її заглибленні на 0,8м в ґрунтах III категорії: P – Сумарне значення опору розробки ґрунту; P_p – опір різання ґрунту ножовим робочим органом; P_0 – опір протягування в ґрунті трубоукладального обладнання

математичної статистики представлених залежностей дозволила отримати наступне рівняння регресії для визначення сумарного опору розробки ґрунту трубозаглиблювачем:

$$P = 43,67 + 0,905d - 0,0011d^2, \text{ кН}, \quad (10)$$

де d - діаметр труби, мм.

Зусилля опору різання ґрунту ножом при цьому визначається рівністю

$$P_p = 0,56[3,04H_{KP}(14,8H_{KP}^2 + 11,5H_{KP}v + 3v^2) + 31,2(H_{KP}^2 + H_{KP}v)] + 2,28H_{KP}^2 + 1,68(0,8 - H_{KP})vP, \quad \text{кН}, \quad (11)$$

де H_{KP} - критична глибина різання, для суглинку III категорії міцності дорівнює:

$$H_{KP} = 2,32v, \text{ м.}$$

Зусилля протягування обладнання для заглиблення труби:

$$P_0 = 0,157 \frac{qL_T^5}{EI} H_T + 15,35v \frac{L_T}{L_T} \left(H_T L_T - 1,9 \cdot 10^{-2} \frac{qL_T^5}{EI} \right), \text{ кН}. \quad (12)$$

$$H_T = 0,8 + 0,3H_{KP}, \text{ м}, \quad (13)$$

де q, E, I - відповідно погонний вага труби кН/м, модуль пружності кН/м² і момент інерції м⁴.

Рівняння (10) справедлива для труб діаметром 75÷225мм при прокладанні труб у ґрунтах III категорії міцності.

За величиною даного зусилля підбирається тяговий засіб для трубозаглиблювача. Відповідно до рис.1 для укладання труб діаметром до 90мм може бути використаний трактор Т-130, діаметром до 180мм – трактор Т-180, діаметром до 225мм – трактор Комацу Д-355, універсальне шасі УШ-16 тощо. Вимоги до тягового засобу можуть бути знижені, залежно від організації робіт:

- використанням додаткового трактора з якірною лебідкою;
- буксирування трубозаглиблювача іншим трактором;
- попередньою нарізкою щілини по трасі газопроводу.

Основними параметрами обладнання для заглиблення труби є:

- Висота обладнання;
- Довжина обладнання;
- Ширина обладнання.

Висота обладнання від низу до верхніх роликів може бути визначена рівняннями (8) та (9).

$$H_T = H + h_n, \quad (14)$$

де H - Глибина укладання труби визначається умовою (6);

h_n - висота підйому ґрунту над поверхнею різання його ножом, (рис.3), дорівнює, (15):

$$h_n = (K_p - 1)H_k, \quad (15)$$

де H_k - критична глибина різання.

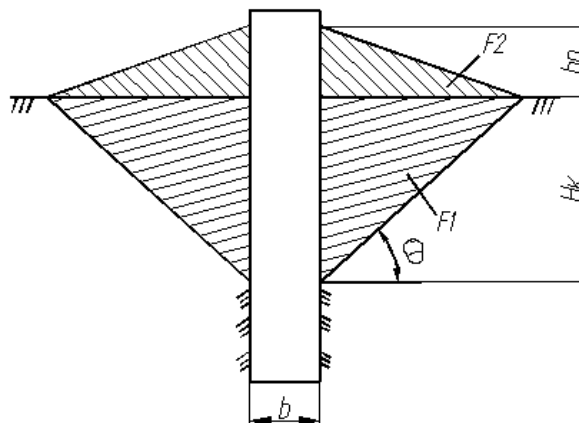


Рис. 3 – Схема до розрахунку висоти підйому розпушеного ґрунту

З урахуванням даних експериментальних досліджень необхідна формула набуде вигляду.

$$H_T = 0,8 + d + 1,1e_0, \text{ м.} \quad (16)$$

Довжина прогину труби при вільному провисанні визначається рівністю

$$L_T = \sqrt[4]{\frac{24EIH_T}{q}}, \quad (17)$$

де I - момент інерції перерізу труби, м^4 ;

E - модуль пружності, для поліетиленових труб, $700 \cdot 10^3$ КПа;

q - погонна вага труби, кН/м .

Довжина обладнання може бути прийнята рівною величиною.

Довжину обладнання можна суттєво скоротити установкою притискних роликів при дотриманні вимог, які пред'являються до гранично допустимого радіусу згину труби [14]:

$$R \geq 30d, \quad (18)$$

Ця умова дійсна при температурі зовнішньої поверхні труби не вище 20°C.

З урахуванням викладеного прораховано значення довжини провисання труби L_T в обладнанні з притискними роликами. Дані розрахунків наведено у табл.1.

Таблиця 1 – Дані прогину труби в устаткуванні з притискними роликами

Найменування величини	Діаметр труби, мм								
	75	90	110	125	140	160	180	200	225
Товщина стінки труби, мм	6,8	8,2	10	11,4	12,7	14,6	16,4	18,2	20,5
Довжина прогину труби при вільному провисанні, L_T , м	5,68	6,20	6,93	7,43	7,92	8,54	9,15	9,72	10,4
Довжина прогину труби в устаткуванні з притискними роликами, L_T , м	3,5	3,76	4,26	4,62	4,96	5,43	5,88	6,33	6,88

Для здійснення поворотів газопроводу по трасі обладнання для заглиблення труб необхідно виготовляти із шарнірно-зчленованих секцій. Число секцій n може бути визначено за рівнянням:

$$n = \frac{L_{T1}}{2,8\sqrt{R_n \delta}}, \quad (19)$$

де R_n - радіус повороту газопроводу трасою в горизонтальній площині.

Згідно з поданими розрахунками, трубоукладальне обладнання доцільно виготовляти у вигляді конструкції, що складається з 2-3 секцій.

У запропонованій розрахунковій залежності (12) закладено умову утворення прогину трубопроводу при мінімальній висоті його підйому, що є важливою вимогою для збереження в трубі мінімальної напруги при її укладанні. Однак ця умова не завжди реалізована, оскільки визначається конструктивними особливостями машин і обраними схемами укладання труби (рис.4). У цьому випадку профіль обладнання може бути визначений рівнянням (20).

$$y = \frac{qx^2}{24EI} (2L_T^2 - x^2), \quad (20)$$

Де x , y – координати прогину трубопроводу, що визначають конструктивні розміри трубоукладального обладнання залежно від схеми розташування щодо тягового засобу (рис.4).

Викладене дозволяє визначити параметри робочого устаткування трубозаглиблювача, які необхідні для його проектування.

У практиці запропонована методика розрахунку параметрів обладнання була реалізована під час створення трубозаглиблювача для прокладання розподільних газопроводів із поліетиленових труб на базі універсального тракторного шасі УШ-16. Випробування експериментального зразка машини проводилися на науково-дослідному полігоні ХНАДУ. Машина була розрахована на прокладання поліетиленової труби діаметром 160мм та мала такі технічні характеристики:

- тягове зусилля базової машини – 30,6 т;
- максимальна глибина прокладки – до 1,4 м;



Рис. 4 – Укладання поліетиленового газопроводу $\varnothing 160\text{мм}$ ножовим трубозаглиблювачем на базі уніфікованого шасі УШ-16

- схема подачі труби – збоку трактора;
- тип ґрунту, що розробляється - суглинок II-III категорії міцності;
- ширина ножового робочого органу – $0,215\text{ м}$;
- ширина обладнання для укладання – $0,2\text{ м}$;
- довжина обладнання для укладання – 6 м ;
- кількість секцій – 2;
- радіус повороту траси – не менше 114 м ;
- технічна продуктивність – $2\text{--}3\text{ км/год}$.

Таким чином, теоретичне обґрунтування параметрів обладнання та інженерний метод тягового розрахунку трубозаглиблювача отримали експериментальне підтвердження та можуть бути рекомендовані для впровадження при створенні машин для швидкісного прокладання розподільних газопроводів за прогресивною технологією методом заглиблення.

Висновки

Виконано обґрунтування параметрів трубозаглиблювального обладнання, визначених діаметром труби, її фізико-механічними властивостями, а також ґрунтовими умовами та схемою укладання. Використання притискних роликів зменшує довжину обладнання за допустимих радіусів вигину поліетиленових труб на $33\text{--}39\%$. Виконання поворотів газопроводів на трасі забезпечується виготовленням трубозаглиблювального обладнання з $2\div 3$ шарнірно з'єднаних секцій. Основні теоретичні положення роботи отримали практичне підтвердження дослідною експлуатацією натурного зразка трубозаглиблювача на базі уніфікованого шасі УШ-16.

Список використаних джерел:

1. Машини для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учеб. пособие / С. В. Кравец [и др.]. – Харьков : Фавор, 2008. – 256 с.
2. Правила безпеки систем газопостачання України : ДНАОП 0.00-1.20-98 : затвердж. Державним комітетом України по нагляду за охороною праці 01.10.97 : початок дії з 01.10.1997. – Київ : УкрНДІнжпроект, 1998. – 368 с.
3. Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень : ДБН 360-92**. – [Зі змінами документ актуальний від 2017-07-01]. – Київ : Держбуд України, 1992. – 137 с.
4. Najafi M. Trenchless technology piping. Installation and inspection / M. Najafi. – Alexandria : ASCEpress, WEF Press Water Environment Federation, 2010. – 482 с.
5. Xin J. Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology [Electronic resource] / J. Xin // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. – 2014. – Access mode: <https://doi.org/10.1061/9780784413821.051> (Last accessed: 10/10/2022).

6. Allouche E. N. State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations [Electronic resource] / E. N. Allouche, S. T. Ariaratnam. – Access mode: [https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55) (Last accessed: 10/10/2022).

7. Супонев В. М. Тенденции развития технологий и оборудования для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций в городских условиях [Электронный ресурс] / В. М. Супонев, С. М. Вивчар, С. П. Балесный // Наукові вісті Дніпровського університету. – 2017. – № 12. – Режим доступа: http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/03/2017_12_8.pdf (дата обращения: 22.10.2022 р.)

8. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V. K. Rudnev [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2015. – № 2. – С. 100–107.

9. Кравець С. В. Наукові основи створення землерійно-ярусних машин і підземнорухомих пристроїв: монографія / С. В. Кравець, В. В. Кованько, О. П. Лукянчук. – Рівне : НУВГП, 2015. – 322 с.

10. Васильев С. Г. Подземное строительство неглубокого заложения / С. Г. Васильев. – Львов : Вища школа, 1980. – 144 с.

11. Полтавцев И. С. Специальные землеройные машины и механизмы для городского строительства / И. С. Полтавцев, В. Б. Орлов, И. Ф. Ляхович. – Киев : Будівельник, 1977. – 136 с.

12. Ветров Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю. А. Ветров. – М. : Машиностроение, 1971. – 359 с.

13. Полимеры в газоснабжении : справочник / В. Е. Удовенко [и др.]. – М. : Машиностроение, 1998. – 856 с.

14. Зеленін А. Н. Наиболее представительные грунты по трудности их экскавации на территории СССР / А. Н. Зеленін // Исследование рабочих процессов дорожно-строительных машин : труды МАДИ. – 1974. – Вып. 78. – С. 8–13.

Referens

1. Kravec, SV, Rudnev, VK, Kaslin, ND & Suponev, VN 2008, *Mashiny dlya bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij*, Favor, Harkov.

2. Proektnyi ta naukovo-doslidnyi instytut po hazopostachanniu, teplopостachanniu ta kompleksnomu blahoustroiu mist i selyshch Ukrainy 1998, *Pravila bezpeki sistem gazopostachannya Ukrayini*, DNAOP 0.00-1.20-98, UkrNDIinzhpoeekt, Kyiv.

3. Derzhbud Ukrayini 1992, *Mistobuduvannya. Planuvannya i zabudova miskih i silskih poselen DBN 360-92***, [Zi zminami dokument aktualnij vid 2017-07-01], Derzhbud Ukrayini, Kyiv.

4. Najafi, 2010, *Trenchless technology piping. Installation and inspection*, ASCEpress, WEF Press Water Environment Federation Alexandria, Virginia.

5. Xin, J 2014, 'Application of Trenchless Pipeline Rehabilitation Technology', *International Conference on Pipelines and Trenchless Technology*, viewed 10/10/2022, <<https://doi.org/10.1061/9780784413821.051>>.

6. Allouche, EN & Ariaratnam, ST 2012, *State-Of-The-Art-Review Of No-Dig Technologies for New Installations*, viewed 10/10/2022, <[https://doi.org/10.1061/40641\(2002\)55](https://doi.org/10.1061/40641(2002)55)>.

7. Suponyev, VM, Vivchar, SM & Balesnyj, SP 2017, 'Tendencii razvitiya tehnologij i oborudovaniya dlya bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij v gorodskih usloviyah', *Naukovi visti Dalivskogo universitetu*, no. 12, viewed 22.10.2022, <http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/03/2017_12_8.pdf>.

8. Rudnev, VK, Suponiyv, VN, Saenko, NV et al. 2015, 'Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells', *Magazine of Civil Engineering*, no. 2, pp. 100-107.

9. Kravec, SV, Kovanko, VV & Lukyanchuk, OP 2015, *Naukovi osnovi stvorenniya zemlerijno-yarusnih mashin i pidzemnorumih pristroyiv*, Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia, Rivne.

10. Vasilev, SG 1980, *Podzemnoe stroitelstvo neglubokogo zalozeniya*, Visha shkola, Lvov.

11. Poltavcev, IS, Orlov, VB & Lyahovich, IF 1977, *Specialnye zemlerojnye mashiny i mehanizmy dlya gorodskogo stroitelstva*, Budivelnik, Kyiv.

12. Vetrov, YuA 1971, *Rezanie gruntov zemlerojnymi mashinami*, Mashinostroenie, Moskva.

13. Udoenko, VE, Gvozdev, IV, Karnauh, IM et al. 1974, *Polimery v gazosnabzhenii*, Mashinostroenie, Moskva.

14. Zelenin, AN 1974, 'Naibolee predstavitelnye grunty po trudnosti ih ekskavacii na territorii SSSR', *Issledovanie rabochih processov dorozhno-stroitelnyh mashin*, iss. 78, pp. 8-13.

Стаття надійшла до редакції 26 січня 2023 року

DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-51-60

УДК [621.313.322:681.51]:006.85

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ КОНДЕНСАТОРІВ ПАРОВИХ ТУРБІН

© 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 Yurii): 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 та удосконалено систему технічної діагностики елементів систем низькопотенційних комплексів (конденсатори, циркуляційні та конденсатні насоси, ежектори) теплових і атомних електростанцій. Визначені перспективи підвищення ефективності роботи систем технічної діагностики елементів низькопотенційних комплексів шляхом одночасного використання в системах технічної діагностики експертних оцінок та ефективних алгоритмів, що дозволяє врахувати всі можливі режими роботи обладнання, вирішувати завдання, які важко формалізуються або завдання, які не мають алгоритмічного рішення. Експертна оцінка проводиться за результатами моніторингу, у тих випадках, коли джерело та причини відмови не очевидні, що дозволяє ефективно використовувати досвід експлуатаційного та оперативного персоналу електростанцій. Визначено основні функції системи технічної діагностики низькопотенційних комплексів. Визначено параметри, які суттєво впливають на теплообмін в конденсаторі та в значній мірі визначають енергетичну ефективність роботи парових турбіни теплових і атомних електростанцій особливо на часткових навантаженнях енергоблоку. До таких параметрів відносяться тиск відпрацьованої в турбіні пари і температурний напір в конденсаторі при заданих значеннях витрати пари та охолоджувальної води у конденсаторі турбіни; температури охолоджуючої води на вході в конденсатор. Наведено співвідношення для визначення цих параметрів. Визначені фактори, які необхідно враховувати при розробці систем технічної діагностики. Наведено основні етапи роботи системи технічної діагностики елементів низькопотенційних комплексів, повний алгоритм операцій системи технічної діагностики та алгоритм визначення ступеня забруднення трубок конденсаторів, який є найбільш характерним в умовах експлуатації енергоблоків теплових і атомних електростанцій та суттєво впливає на процеси теплообміну та енергетичну ефективність парових турбін. Системи технічної діагностики можуть бути реалізовані або як спеціалізовані підсистеми у складі АСУ ТП енергоблоків, або як окремі автономні системи.

Ключові слова: діагностика, низькопотенційний комплекс, конденсатор.

Chebotarev A., Bondarenko Yu. “Increasing the level of information use in technical diagnostic systems of steam turbine condensers”.

The article analyzes and presents an advanced system of technical diagnostics of elements of low-potential complexes (condensers, circulation and condensate pumps, ejectors) at thermal and nuclear power plants. The paper defines certain prospects of increasing the efficiency of the functioning of systems of technical diagnostics of elements of low-potential complexes by means of

simultaneously using expert evaluation and efficient algorithm. This allows taking into account all possible states of working equipment, and solving badly formalized problems or problems which have no algorithmic solution.

Expert evaluation is carried out based on monitoring results, in cases where the source and reasons for the failure are not obvious, which allows for effective use of the experience of operational and operational staff of power plants. The main functions of the system of technical diagnostics of low-potential complexes are singled out. The parameters that significantly affect the heat exchange in the condenser and largely determine the energy efficiency of steam turbines of thermal and nuclear power plants, especially at partial loads of the power unit, are determined. Such parameters include the pressure of the steam exhausted in the turbine and the temperature pressure in the condenser at the given values of the flow rate of steam and cooling water in the turbine condense, and the temperature of the cooling water at the inlet to the condenser. The ratio for determining these parameters is given. The factors that must be taken into account when designing systems of technical diagnostics are defined. The main stages of the system of technical diagnostics of elements of low-potential complexes, the full algorithm of operations of the technical diagnostics system and the algorithm for determining the degree of pollution of condenser tubes, which is most characteristic in the operating conditions of power units of thermal and nuclear power plants and significantly affects the processes of heat exchange and energy efficiency of steam turbines, are presented. Technical diagnostics systems can be implemented either as specialized subsystems in the ACS of power units, or as separate autonomous systems.

Keywords: diagnostics, low-potential complex, condenser.

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

Загострення проблем у паливно-енергетичному комплексі і погіршення екологічної ситуації диктує необхідність нового підходу до рішення проблем підвищення економічності та екологічних характеристик теплових і атомних електростанцій. У зв'язку із цим, в енергетичній галузі велика увага стала приділятися низькопотенційним комплексам електростанцій як структурних одиниць енергоблоків, що безпосередньо суттєво впливають на економічність їхньої експлуатації за рахунок впливу на кінцеві параметри пари та на витрату електроенергії на власні потреби [1]. Велика частка всієї енергії (30-40%), яка виробляється котлом або реактором втрачається в конденсаторі, який підтримує необхідний рівень вакууму на виході з парової турбіни. Основним обладнанням низькопотенційного комплексу є конденсатор, циркуляційний і конденсатний насоси та ежектор.

Згідно з даними Запорізької АЕС, половина всієї недовиробки енергії приходить на погані умови теплообміну в конденсаторі та складає щорічно майже 1,5 млрд. кВт·год [2, 3]

Діагностування енергоустановок є одним із найбільш ефективних способів підвищення економічності, надійності, довговічності, екологічності та соціально-економічної ефективності теплових електростанцій в умовах їхньої тривалої експлуатації, тому своєчасне визначення характеристик конденсаторів та елементів систем низькопотенційних комплексів (НПК) з метою запобігання погіршення теплообміну в конденсаторі, являє собою важливу й актуальну науково-практичну задачу. Ця задача може бути вирішена шляхом підвищення рівня використання інформації в системах технічної діагностики елементів НПК та удосконалення алгоритмів діагностики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дотепер накопичений багатий науковий матеріал теорії керування та діагностики НПК. У цей час питаннями ефективного керування елементами НПК займається ряд

відомих наукових шкіл і колективів як на Україні, так і в зарубіжжі. Визначені резерви при керуванні елементами НПК [4, 5], розвивається теорія енергозберігаючого керування [6], проводиться модернізація сучасних систем керування [7, 8] та оптимізація параметрів і режимів робот НПК [9, 10]. Проводяться дослідження нормативного забезпечення щодо ефективності роботи НПК з метою його удосконалення [11]. Багато наукових рішень втілено в практику експлуатації електростанцій [12, 13], в тому числі з метою діагностики елементів НПК [1, 14].

Незважаючи на велику кількість наукових робіт в цьому напрямку, питання удосконалення систем діагностики елементів НПК є актуальним. Удосконалення інформаційно-вимірювальної техніки, підвищення точності визначення параметрів та погіршення стану обладнання, обумовлене фізичним та моральним зносом, висуває більш жорсткі вимоги до систем діагностики.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою досліджень є удосконалення систем діагностики системи НПК шляхом використання експертних оцінок та ефективних алгоритмів своєчасного виявлення погіршення вакууму в конденсаторі та інших ненормальних режимів роботи елементів НПК з функцією встановлення причин їх виникнення.

Виклад основного матеріалу

Система технічного діагностування та управління (СТДУ) НПК електростанцій призначена для підвищення економічності, надійності, довговічності та екологічної чистоти енергоблоків.

До цього часу контроль та технічна діагностика конденсаційних установок зазвичай здійснювалися у двох формах: аналізу, що проводиться за допомогою алгоритмів та вимірювальних засобів АСУ ТП та систем автоматичного контролю, висновків та рекомендацій, отриманих на основі періодичних та регламентованих ПТЕ випробувань, здійснюваним персоналом цеху налагодження ТЕС або зовнішніх організацій. Застосування системи оперативної діагностики з урахуванням ЕОМ дозволяє як збільшити обсяг аналізованої інформації.

Підвищити періодичність контролю для оперативного відстеження та діагностування особливостей та змін станів конденсаційної установки, а також реалізувати більш високий рівень аналізу, даючи деякі прогностні оцінки та безпосередні рекомендації персоналу, що полегшують управління та підтримку економічних режимів роботи обладнання.

Застосування експертних систем для діагностики та аналізу роботи такої багатофакторної системи, якою є конденсаційна установка, дуже доцільно, так як вони призначені для вирішення задач, що важко формалізуються або завдань, що не мають алгоритмічного рішення. З'являється можливість підвищення рівня експлуатації обладнання під час використання у повсякденній практиці знань висококваліфікованих експертів, які беруть участь у виробленні вирішення завдань оперативного контролю та діагностики.

Включення в систему діагностики експертної системи дозволяє при встановленні причин порушень у роботі конденсаційної установки подолати труднощі, пов'язані з неоднозначністю поведінки обладнання, а також отримувати достовірні висновки при неповній та фрагментній інформації.

Програмна оболонка експертної системи включає базу знань, що містить у формалізованому вигляді експертну інформацію про можливі порушення в роботі елементів конденсаційної установки конкретного турбоагрегату. Конкретне заповнення основи знань, тобто. формування її змісту та встановлення апріорних ймовірностей гіпотез та "ціни" свідочств проводяться методом експертних оцінок із залученням фахівців, що працюють з

тепломеханічним обладнанням ТЕС, при цьому враховується специфіка роботи обладнання на конкретній електростанції.

При переході від моніторингу наступного рівня діагностики, тобто. до експертної системи, програма звернеться до результатів, отриманих на першому рівні, проаналізує їх і запросить інформацію, що не вистачає, з бази даних або у користувача. Отримані відповіді будуть формалізовані залежно від ступеня їхньої визначеності, і отримана таким чином "ціна" кожного свідчення буде врахована при розрахунку апостеріорної ймовірності всіх гіпотез і зробить остаточний висновок про причину несправності.

Після встановлення причин наявних несправностей система діагностики може дати рекомендації персоналу щодо способів усунення діагностованих порушень та деякі прогнозні оцінки щодо, наприклад, визначення терміну чищення поверхні конденсатора, якщо причиною порушення є забруднення трубок.

Система забезпечує:

- технічну діагностику обладнання НПК з метою підвищення надійності, довговічності та екологічної чистоти енергоблоків;
- оптимізацію режимів роботи та експлуатації енергоблоків з урахуванням графіків енергетичних навантажень, справності обладнання, екологічної та метеорологічної обстановки;
- підвищення надійності роботи енергоблоків;
- збільшення міжремонтних періодів експлуатації енергетичного обладнання; – вибір оптимальних видів ремонтів, модернізації та реконструкції;
- зниження ступеня забруднення навколишнього середовища;
- скорочення витрат палива та водних ресурсів.

Система передбачає збір інформації про параметри енергоносіїв та стан обладнання з максимальним використанням штатних приладів, накопичення бази даних, обробку інформації на ЕОМ та видачу рекомендацій. Вона може працювати як автономно, так і у складі АСУТП енергоблока (у режимі підсистеми).

Реалізація СТДУ НПК можлива у межах різних моделей [15]:

- мінімальної, що забезпечує програмно-інструментальні засоби для інженерів ТЕС з оперативного контролю (моніторингу) параметрів стану елементів установки в обсязі прийнятому на електростанції, зіставлення фактичних значень параметрів з нормативними, а також побудова ретроспективи параметрів стану установки та виявлення тенденцій їх зміни, що особливо важливо при низькій надійності та точності показань вимірювальних засобів;
- максимальної, що містить не тільки підсистеми збору та обробки інформації, але й реалізує крім моніторингу завдання вищого рівня, експертні завдання з виявлення причин порушень у роботі обладнання та оптимізаційні завдання, такі як, наприклад, оптимізація роботи системи, оптимізація термінів чищення та заміни трубок поверхні теплообміну тощо;
- інженерної, що займає проміжне положення за обсягом і складністю між першими двома.

Загальноприйнятим методом контролю за роботою конденсаційної установки є регулярне порівняння фактичних експлуатаційних показників його роботи з нормативними показниками, отриманими на підставі випробувань однотипного обладнання при свідомо справному та чистому стані всіх елементів установки

Для своєчасного та якісного проведення перерахованих вище заходів здійснюється безперервний контроль параметрів.

До основних параметрів, що характеризують роботу НПК, відносяться тиск відпрацьованої в турбіні пари (P_K) і температурний напір в конденсаторі (δT) при заданих значеннях:

- витрати пари (D_K) та охолоджувальної води (G_B) у конденсаторі турбіни;
- температури охолоджуючої води на вході в конденсатор (T_{B1}).

Ці параметри визначають рівень термодинамічного досконалості циклу турбоустановки, характеризуючи величину теплоперепаду залежно від кінцевого тиску. Одночасно вони дають можливість оцінки впливу НПК та енергоблоку на довкілля.

Визначення тиску відпрацьованої пари (P_k) проводиться шляхом безперервного вимірювання штатними контрольно-вимірвальними приладами (КВП). Безперервний контроль з використанням штатних КВП ведеться за параметрами, перерахованими вище.

Значення температурного напору (δT) визначається як різниця температур пари на вході в конденсатор (T_{kp}) та охолоджуючої води на виході з конденсатора (T_{2b}), тобто

$$\delta T = T_{kp} - T_{2b}, ^\circ\text{C} \quad (1)$$

Витрата пари в конденсатор може бути визначена з урахуванням витратного коефіцієнта (K_p), зазначеного в нормативних характеристиках для кожного типу турбін, за формулою:

$$D_k = K_p \cdot P_p, \text{ т/год} \quad (2)$$

де K_p – витратний коефіцієнт (т/год)/МПа;

P_p – тиск пари в контрольному ступені, МПа.

Крім цього, витрата пари (D_k) може бути визначена з розрахунку теплової схеми турбоустановки. Цей метод в даний час більш кращий для турбоустановок, що тривалий час в експлуатації і зазнали значного фізичного зносу. Тим більше, що використання ЕОМ при розрахунку схеми спрощує цей метод і підвищує його точність.

Витрата охолоджувальної води G_b може бути визначена або за допомогою витратоміра, або за характеристикою циркуляційного насоса, або за витратою електроенергії та на насос насоса (при заданому тиску нагнітання $P_{пн}$, тиску на всмоктуванні в насос $P_{цв}$ і ККД насоса $\eta_{пн}$). Однак на практиці витрати охолоджувальної води для потужних енергоблоків частіше визначають із теплового балансу конденсатора:

$$G_b = \frac{D_k (h_k - h'_k)}{\Delta T_b \cdot C_b}, \text{ кг/год} \quad (3)$$

де D_k – витрата пари в конденсаторі, кг/год;

h_k, h'_k – відповідно, ентальпії пари і конденсату, кДж/кг;

C_b – теплоємність води, кДж/(кг $^\circ\text{C}$);

ΔT_b – нагрів води в конденсаторі, $^\circ\text{C}$.

Чистота поверхні трубок конденсатора визначається також аналітично з використанням значень: коефіцієнта теплопередачі пари, конденсату, температурного напору, температур і витрати охолоджувальної води або методами, пропонуваними нижче.

Найбільш простим методом визначення коефіцієнта теплопередачі K у конденсаторі є розрахунок його за формулою:

$$K = \frac{C_b \cdot G_b \cdot \ln \frac{\delta T - \Delta T_b}{\delta T}}{F_k}, \text{ Вт/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2 \quad (4)$$

де F_k – поверхня охолодження конденсатора, м^2 ;

δT – температурний напір в конденсаторі, $^\circ\text{C}$.

Експертна оцінка проводиться за результатами моніторингу, у тих випадках, коли джерело та причини відмови не очевидні. У цих випадках експлуатаційний персонал або ЕОМ звертаються до банку даних щодо відмов, які введені на згадку про ЕОМ, або до експерта. Експертом має бути висококласний фахівець із числа працівників ТЕС.

До банку даних вносять енергетичні характеристики конденсаторів, насосів, ежекторів тощо. Крім цього, вносять характеристики відмов в елементах НПК (їх причини, джерела, періодичність відмов).

До висновку належить – рекомендації щодо оптимізації режиму НПК.

До завдання оптимізації НПК входить:

– вибір оптимального варіанту з можливих (за економічності, надійності та екологічності);

– приведення НПК в оптимальний стан.

При розробці СТДУ НПК враховуються такі фактори:

- вимірювання параметрів та обробка результатів здійснюється безперервно, періодично або епізодично;

- параметри визначаються шляхом прямих вимірів з використанням КВП;

- інтегральний вимір параметрів (за показаннями кількох приладів);

- аналітичний вимір параметрів, переважно видаткових;

- інтегральний вимір із використанням приладів контролю та аналітичних вимірювань. Під виміром параметрів мається на увазі визначення параметрів за допомогою КВП та обробка результатів з урахуванням похибок системи вимірювання та інших факторів.

Розробка алгоритму СТД НПК включає [1, 5, 15]:

- вибір оптимальної кількості параметрів, що характеризують роботу та стану НПК;

- накопичення бази даних щодо відмов у роботі НВК та енергоблоку;

- нагромадження бази даних за способами локалізації відмов.

Послідовність операцій, що виробляються системою, зображена на рис. 1.

Основними етапами роботи системи є [1, 5, 15]:

- контроль поточних значень параметрів (P_{ki} , X_{ki} і т.і.);

- порівняння параметрів ($P_{ki} = P_{k0}$) і видача сигналу;

- при $P_{ki} = P_{k0}$ продовжити виконання заданого режиму експлуатації.

- при $P_{ki} \neq P_{k0}$ та необхідності переходу на новий режим роботи зробити вибір оптимального режиму з урахуванням зовнішніх умов N_{ei} , Q_{mi} , $T_{нвi}$ і т.і.;

- при $P_{ki} \neq P_{k0}$:

- повторно перевірити коректність заміру параметра прямим та непрямым заміром

$P_{ki} = f(T_{ki}, T_{2vi} \dots)$;

- перевірити $\frac{\Delta P_{ki}}{\Delta t} \geq 0$.

Далі алгоритм наступний:

1. У випадку $\frac{\Delta P_{ki}}{\Delta t} = 0$ (відмова не розвивається). Продовжити пошук джерела відмови;

2. У разі, якщо: джерело відмови не знайдено, але $\Delta P_{ki} / \Delta t = 0$ необхідно вибрати оптимальний режим роботи НПК, енергоблоку, станції.

3. Джерело відмови не знайдено, але $\Delta P_{ki} / \Delta t > 0$ – необхідно вимикати енергоблок.

4. При $\Delta P_{ki} / \Delta t > 0$ – відключити енергоблок (або ввести резервний елемент НПК).

5. Після усунення, локалізації джерела відмови:

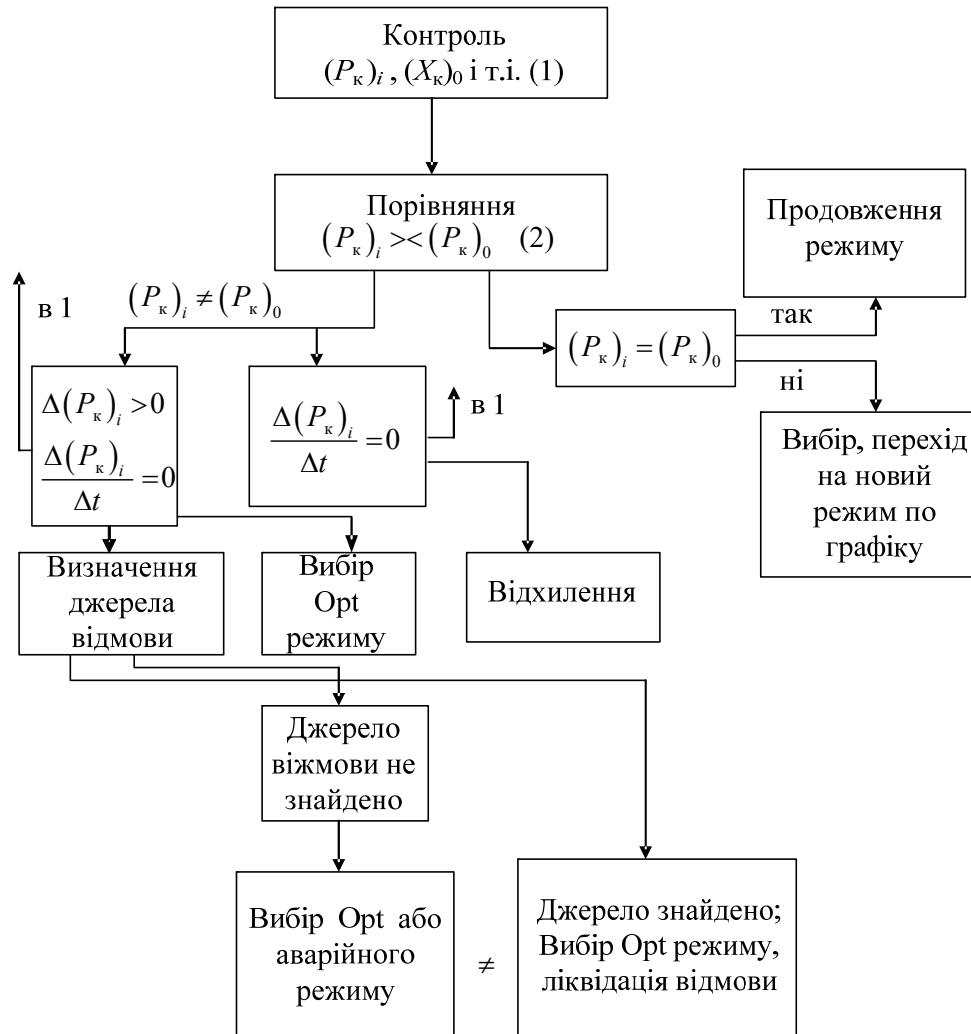
5.1. повторити пп. 1-2, 4.

Для математичного забезпечення системи можна використовувати математичні моделі елементів НПК [15]:

- останнього ступеня турбіни;

- конденсатора турбіни;

- системи водопостачання

**Рис. 1** – Алгоритм операцій системи технічної діагностики НПК

Визначення ступеня забруднення трубок конденсаторів є найбільш характерним в умовах експлуатації енергоблоків ТЕС і АЕС. Алгоритм вирішення цього завдання включає наступні операції [1, 5, 15]:

1. Визначення масових витрат:
 - пари D_2 ; – води $G_{цв}$; – конденсату G_k ;
2. Визначення масових витрат пари і води, в залежності від режиму роботи енергоблоків:
 - води $G_{цв} = f(D_2)$; – пари $D_2 = f(G_{цв})$; – пари $D_2 = f(G_k)$;
3. Визначення термодинамічних параметрів пари, води, конденсату P_k , T_k , h_k , X_k ; $T_{в1}$, $T_{в2}$, $h'_{в1}$, $h'_{в2}$, P_1^B , P_2^B , $T_{кн}$, $h'_{кн}$;
4. Визначення коефіцієнта теплопередачі (з рівняння теплопередачі)

$$Q_k = K \cdot F_k \cdot \Delta T = D_k \cdot q_k = G_{цв} \cdot (h'_{в2} - h'_{в1}). \quad (5)$$

- 4.1. Визначення температурного напору:

$$\Delta T = T_{кн} - T_2^B; \quad (6)$$

- 4.2. Визначення:

$$q_k = h_k - h'_{кн};$$

- 4.3. Визначення:

$$\Delta h'_{в} = h'_{в2} - h'_{в1};$$

4.4. Визначення поверхні охолодження конденсатора:

$$F_k = \pi \cdot d_2 \cdot l \cdot Z, \quad (7)$$

де: Z – кількість діючих трубок в конденсаторі, (виключаються заглушені); l – довжина трубки (в одному ході), (м); d_2 – зовнішній діаметр трубки, (м).

4.5. Визначення теплового навантаження конденсатора:

$$Q = D_2 \cdot q_k = G_{цв} \cdot \Delta h'_в; \quad (8)$$

4.6. Визначення коефіцієнта теплопередачі:

$$K = \frac{Q_k}{\Delta T \cdot F_k}; \quad (9)$$

5. Визначення питомого парового навантаження конденсатора:

$$d_k = D_2 / F_k, \text{ (кг/с)/м}^2; \quad (10)$$

6. Визначення швидкості води в трубках конденсатора: $w = \frac{Q_{цв} \cdot 10^6}{f \cdot 3600},$

де: $f = \pi \cdot d_1^2 Z_1 / 4$ – площа прохідного перетину трубок в одному ході, м²;

Z_1 – число діючих трубок в одному ході, шт;

d_1 – внутрішній діаметр трубки конденсатора, м;

7. Визначення зміни опору конденсатора:

$$\Delta P = \Delta P_i - \Delta P_0; \quad (11)$$

8. З формули для визначення гідравлічного опору

$$\Delta P = 9,81 \cdot Z_1 \left(\frac{C \cdot l}{\alpha_c} Q_{цв}^{1,75} + 0,135 Q_{цв}^{1,75} \right) \quad (12)$$

визначаємо коефіцієнт стану трубок:

$$\alpha_c = \frac{9,81 \cdot Z_1 \cdot C \cdot l \cdot Q_{цв}^{1,75}}{\Delta P - 9,81 \cdot 0,135 Q_{цв}^{1,5} \cdot Z_1}.$$

Тут: $C = f(d_1, T_в)$ – множник; l – довжина трубки (в ході);

$\Delta P = P_1^в - P_2^в$ – гідравлічний опір (хода) конденсатора, кПа;

9. Визначається коефіцієнт чистоти трубок конденсатора:

$$\alpha = \alpha_c \cdot \alpha_n,$$

де α_n – коефіцієнт, який залежить від матеріалу і товщини стінок трубки;

10. Визначається відносний приріст коефіцієнта:

$$\overline{\alpha_i} = \alpha_0 \cdot \left(\frac{\alpha_{ci} \cdot \alpha_{ni}}{\alpha_{c0} \cdot \alpha_{n0}} \right),$$

де: індекс "i" – дослідний режим; індекс "0" – базовий режим;

11. Визначається коефіцієнт теплопередачі:

$$K_i = 4070 \cdot \alpha_i \left(\frac{1,1 \cdot G_i}{d_2^{0,25}} \right) \cdot \left[1 - \frac{\epsilon(\alpha_i)}{10^3} (35 - T_1^B)^2 \right] \times \left[1 - \frac{Z-2}{15} \left(1 - \frac{T_1^B}{45} \right) \right] \Phi_\delta \quad (13)$$

Системи технічної діагностики, як підтверджують приклади вітчизняних та зарубіжних подібних систем, можуть бути реалізовані або як спеціалізовані підсистеми у складі АСУ ТП енергоблоків, або як окремі автономні системи. При цьому вони можуть забезпечувати всю технологічну схему електростанції або окремі, найбільш відповідальні елементи.

Впровадженню систем діагностування енергоустановок на ТЕС мають передувати підготовленість обладнання та, що особливо важливо, професійна підготовка персоналу електростанції.

Висновки

Незважаючи на велику кількість наукових робіт в напрямку підвищення надійності та енергоефективності роботи систем низькопотенційних комплексів електростанцій, питання діагностики елементів НПК залишається актуальним та своєчасним. Перспективним напрямом в цьому є одночасне використання в системах технічної діагностики експертних оцінок та ефективних алгоритмів, що дозволяє врахувати всі можливі режими роботи НПК.

Визначено основні функції системи технічної діагностики НПК та параметри елементів НПК, які суттєво впливають на теплообмін в конденсаторі та визначають ефективність роботи парової турбіни. Наведені основні співвідношення для визначення цих параметрів.

Наведено основні етапи роботи системи технічної діагностики НПК, повний алгоритм операцій системи технічної діагностики та алгоритм визначення ступеня забруднення трубок конденсаторів, який є найбільш характерним в умовах експлуатації енергоблоків ТЕС і АЕС.

Список використаних джерел:

1. Разработка и анализ технических решений по рационализации конденсационных систем низькопотенциального комплекса ТЭС и АЭС : монография / В. И. Муравьев [и др.]. – Харьков : ХУВС, 2010. – 122 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. Определение оптимального расхода циркуляционной воды в конденсаторах тепловых и атомных электростанций / Г. И. Канюк [и др.] // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2015. – № 6 (137). – С. 12–19.
4. Анализ резервов энергосбережения и возможностей повышения технико-экономической эффективности насосных установок низькопотенциального комплекса (НПК) тепловых и атомных электростанций / С. Ф. Артюх [и др.] // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2005. – Вып. 57. – С. 32–42.
5. Резервы энергосберегающего управления технологическими процессами на действующих ТЭС и АЭС: монография / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2012. – 184 с.
6. Дуель М. А. Развитие систем энергосберегающего автоматизированного управления энергопроизводством ТЭС и АЭС Украины / М. А. Дуель, Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря. – Харків : Точка, 2013. – 388 с.
7. Горелик Т. Г. Современные автоматизированные системы управления энергообъектами / Т. Г. Горелик, А. А. Касаточкин, И. Е. Кумец // Электрические станции. – 2003. – № 7. – С. 32–37.
8. Горелик А. Х. Развитие и модернизация АСУ энергоблоками ТЭС и АЭС / А. Х. Горелик, М. А. Дуэль, В. А. Орловский // Новини енергетики. – 2000. – № 11. – С. 30–36.
9. Канюк Г. И. Оптимизация режимов работы низькопотенциальных комплексов ТЭС по критерию минимума энергетических потерь / Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, Т. Н. Фурсова // East European Scientific Journal. – 2016. – № 6, czesc 2. – Р. 108–111.
10. Підвищення ефективності роботи систем низькопотенційного комплексу електростанцій шляхом оптимального керування витратою циркуляційної води / Г. І. Канюк [та ін.] // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2020. – Вип. 4 (52). – С. 34–39.
11. Князева В. Н. Анализ нормативных документов Украины по обеспечению эффективной эксплуатации элементов систем низькопотенциальных 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.

12. Экспериментальные исследования эффективности автоматизированного энергосберегающего управления циркуляционными насосами электростанций / Г. И. Канюк [и др.] // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2015. – № 9 (140). – С. 36–42.

13. Аракелян Э. К. Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках / Э. К. Аракелян // Теплоэнергетика. – 2002. – № 4. – С. 57–60.

14. Дуэль М. А. Диагностирование состояния и условий эксплуатации энергооборудования ТЭС и АЭС / М. А. Дуэль, А. Л. Дуэль, В. А. Кострыкин. – Харьков : КиК, 2006. – 284с.

15. Научные принципы энергосбережения в тепловой и атомной энергетике / Г. И. Канюк [и др.]. – Харьков : Точка, 2013. – 140 с.

References

1. Muravev, VI et al. 2010, *Razrabotka i analiz tekhnicheskikh reshenij po racionalizacii kondensacionnyh sistem nizkopotencialnogo kompleksa TES i AES*, Harkovskiy universitet Vozdushnyih Sil, Harkov.

2. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Suk, IV 2016, *Metody i modeli energosberegayushchego upravleniya energeticheskimi ustanovkami elektrostancij*, Tochka, Harkov.

3. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Fokina, AR & Babenko, IA 2015, ‘Opredelenie optimal'nogo raskhoda cirkulyacionnoj vody v kondensatorah teplovyh i atomnyh elektrostancij’, *Energobezhenie, energetika, energoaudit*, no. 6 (137), pp. 12-19.

4. Artyuh, SF et al. 2005, ‘Analiz rezervov energosberezheniya i vozmozhnostej povysheniya tekhniko-ekonomicheskoy effektivnosti nasosnyh ustanovok nizkopotencialnogo kompleksa (NPK) teplovyh i atomnyh elektrostancij’, *Vestnik Nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta Harkovskiy politehnicheskij institut*, no. 57, pp. 32-42.

5. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Mihajskij, DV, Laptinov, IP & Fokina, AR 2012, *Rezervy energosberegayushchego upravleniya tekhnologicheskimi processami na dejstvuyushchih TES i AES*, Tochka, Harkov.

6. Duel, MA, Kanyuk, GI & Mezerya, AY 2013, *Razvitie sistem energosberegayushchego avtomatizovannogo upravleniya energoproizvodstvom TES i AES Ukrainy*, Tochka, Harkov.

7. Gorelik, TG, Kasatochkin, AA & Kumec, IE 2003, ‘Sovremennye avtomatizirovannye sistemy upravleniya energoobektami’, *Elektricheskie stancii*, no. 7, pp. 32-37.

8. Gorelik, AH, Duel, MA & Orlovskij, VA 2000, ‘Razvitie i modernizaciya ASU energoblokami TES i AES’, *Novini energetiki*, no. 11, pp. 30-36.

9. Kanyuk, GI, Mezerya, AY & Fursova, TN 2016, ‘Optimizaciya rezhimov raboty nizkopotencialnyh kompleksov TES po kriteriyu minimuma energeticheskikh poter’, *East European Scientific Journal*, no. 6, szesc 2, pp. 108-111.

10. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Chebotarov, AM & Bliznichenko, GS 2020, ‘Pidvischennya efektyvnosti roboti sistem nizkopotencijnogo kompleksu elektrostancij shlyahom optimalnogo keruvannya vitratoyu cirkulyacijnoji vodi’, *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, iss. 4 (52), pp. 34-39.

11. Knyazeva, VN, Mezerya, AY, Chebotarov, AN 2020, ‘Analiz normativnyh dokumentov Ukrainy po obespecheniyu effektivnoj ekspluatatsii elementov sistem nizkopotencial'nyh kompleksov elektrostancij’, *Topical issues of the development of modern science*, The 6th International scientific and practical conference, Publishing House “ACCENT”, Bulgaria, Sofia, pp. 553-557.

12. Kanyuk, GI, Mezerya, AY, Laptinov, IP, Babenko, IA & Knyazeva, VN 2015, ‘Eksperimentalnye issledovaniya effektivnosti avtomatizirovannogo energosberegayushchego upravleniya cirkulyacionnymi nasosami elektrostancij’, *Energobezhenie, energetika, energoaudit*, no. 9 (140), pp. 36-42.

13. Arakelyan, EK 2002, ‘Metodika vybora optimal'nyh parametrov i rezhimov raboty oborudovaniya energoblokov na chastichnyh nagruzkah’, *Teploenergetika*, no. 4, pp. 57-60.

14. Duel, MA, Duel, AL & Kostykin, VA 2006, *Diagnostirovanie sostoyaniya i uslovij ekspluatatsii energooborudovaniya TES i AES*, KiK, Harkov.

15. Kanyuk, GI, Artyuh, SF, Mezerya, AY, Laptinova, EV & Melnikov, VE 2013, *Nauchnye principy energosberezheniya v teplovoj i atomnoj energetike*, Tochka, Harkov.

Стаття надійшла до редакції 27 жовтня 2022 року

DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72

УДК 621.039(045)

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ АЕС У ПОНАДПРОЕКТНИЙ ТЕРМІН В КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ЗЕЛЕНИЙ КУРС

© Грінченко Г.С.¹, Ковтун О.А.², Миколайко В.В.³, Нестеренко Р.О.¹, Антоненко Н.С.¹

*Українська інженерно-педагогічна академія¹, Університет Григорія Сковороди
в Переяславі², Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини³*

Інформація про авторів:

Грінченко Ганна Сергіївна (Гринченко 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.

Ковтун Оксана Анатоліївна (Ковтун Оксана Анатольевна, Kovtun Oksana): ORCID: 0000-0002-9516-8628; e-mail: kovtunok@ukr.net, кандидат педагогічних наук, доцент, Університет Григорія Сковороди в Переяславі, Проректор з міжнародних зв'язків та проектної діяльності, вул. Сухомлинського, 30 м. Переяслав, Київська область, 08401, Україна.

Миколайко Володимир Валерійович (Мыколайко Владимир Валерьевич, Mykolaiko Volodymyr): ORCID: 0000-0002-0515-1241; e-mail: v.mykolaiko@udpu.edu.ua, кандидат педагогічних наук, доцент, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, проректор з міжнародних зв'язків та стратегічного розвитку, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300.

Нестеренко Роман Олександрович (Нестеренко Роман Александрович, Nesterenko Roman): ORCID: 000-0003-2361-9271.; e-mail: roman.nesterenko.uepa@gmail.com, Українська інженерно-педагогічна академія, старший викладач кафедри іншомовної підготовки, європейської інтеграції та міжнародного співробітництва, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Антоненко Наталія Сергіївна (Антоненко Наталья Сергеевна, Antonenko Nataliia): ORCID: 0000-0001-8319-2826; e-mail: nsantonenko2015@gmail.com, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, декан факультету енергетики і автоматизації, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

В статті розглянуто шляхи забезпечення енергетичної безпеки атомних електростанцій як один із напрямків забезпечення циркуляційної економіки в рамках Європейського зеленого курсу. Проаналізовано необхідність енергетичних ресурсів, а саме атомної енергетики, як один з видів “зеленої” енергії, та її роль у “зеленій” трансформації. На основі проведеного аналізу виявлено, що для ефективної зеленої трансформації потрібно забезпечити енергетичну безпеку експлуатації обладнання, що можливо шляхом розробки ефективних науково-обґрунтованих підходів технічної діагностики стану енергосистем та окремого обладнання. Запропоновано методику проведення досліджень технічного стану енергообладнання та представлено результати експериментальних досліджень на прикладі трубопровідних систем головного циркуляційного контуру атомної електростанції. Експериментальні дані, які включали в собі визначення товщини стінки та твердості металу на різних ділянках трубопроводу, порівнювались з вимогами нормативних документів та було виявлено, що дефектів та відхилень від нормативних параметрів не виявлено. На основі проведених експериментальних досліджень запропоновано розрахунковий прогноз подальшої безпечної експлуатації енергообладнання до 2035 року, що передбачає і позапроектний термін експлуатації, як елемент циркуляційної економіки. З метою уточнення прогнозних графіків в якості рекомендацій з управління технічним станом та експлуатаційною безпекою запропоновано запланувати і виконати під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту 2024р контроль та діагностику технічних параметрів енергообладнання.

Ключові слова: Європейський зелений курс, циркуляційна економіка, атомна енергетика, енергетична безпека, прогнозування, зелена енергетика.

Hrinchenko H., Kovtun O., Mykolaiko V., Nesterenko R., Antonenko N. “Ensuring Operational Safety of NPPs beyond the Design Life in the Context of Transition to a Circular Economy: The European Green Deal”

The article discusses ways to ensure energy security of nuclear power plants as one of the areas of circular economy within the framework of the European Green Deal. The necessity of energy resources, namely nuclear energy as a type of "green" energy, and its role in the "green" transformation are analyzed. Based on the analysis, it is found that for an effective green transformation it is necessary to ensure energy safety of equipment operation, which is possible by developing effective science-based approaches to technical diagnostics of the state of power systems and individual equipment. The paper proposes a methodology for conducting studies of the technical condition of power equipment and presents the results of experimental studies on the example of pipeline systems of the main circulation circuit of a nuclear power plant. The experimental data, which included the determination of wall thickness and metal hardness in different sections of the pipeline, were compared with the requirements of regulatory documents and it was found that no defects or deviations from the regulatory parameters were detected. Based on the experimental studies, a calculated forecast of further safe operation of power equipment until 2035 was proposed, which also includes the off-design life as an element of the circular economy. In order to refine the forecast schedules, as recommendations for managing the technical condition and operational safety, it is proposed to plan and perform control and diagnostics of technical parameters of power equipment during the overhaul in the period of scheduled preventive maintenance in 2024.

Keywords: European Green Deal, circular economy, nuclear power, energy security, energy forecasting, green energy.

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

Сучасний стан економічної, соціальної та екологічної систем в світі перебуває у напруженому становищі, через виклики, що постали перед суспільством за період індустріалізації, зі збільшення чисельності населення, що потребує збільшення ресурсів та випробуванням останніх років, як то COVID-19, збройні конфлікти, тощо. Зараз Україна знаходиться в умовах війни, що в умовах глобалізації впливає як на соціально-економічну, так і на екологічну систему в державі та світі, адже наша країна є одним з ключових постачальників різних видів ресурсів (продовольчих, енергетичних, тощо) для Європи та світу. Обмеженість ресурсів спонукає країни Європейського Союзу (ЄС) та інші країни світу до рішучих дій, а саме до змін у напрямку забезпечення сталого розвитку шляхом переходу від лінійної моделі економіки за принципом "Бери-Роби-Викидай" до циркулярної (кругової). Принципи циркулярної економіки впроваджуються в країнах ЄС в рамках Європейського зеленого курсу (ЄЗК) та регулюються на державному рівні, шляхом запровадження політичних ініціатив у різні сектори господарства. Циркуляційна економіка, як напрямок Європейський зеленого курсу спрямована на збереження ресурсів та підвищення ефективності їх використання, зменшення кількості відходів, покращення стану навколишнього середовища, підвищення конкурентоспроможності продукції на основі використання енергоефективних технологій, що в свою чергу покращить економічне та соціальне становище.

Перехід України до циркулярної економіки є одним з важливих етапів євроінтеграції, що дає нові перспективи до сталого розвитку та можливості забезпечення конкурентоспроможності продукції. Разом з тим постають питання щодо стратегії реалізації цього етапу та плавного, а головне безпечного, переходу до ЄЗК з урахуванням потреб в ресурсах для населення. Одним з невід'ємних ресурсних детермінант, що визначають якість життя, є енергетичні потреби і атомна енергетики відіграє значну частку у задоволенні їх та визнана Єврокомісією як "зелена" енергетика у 2022 році, що сприяє до «зеленої

трансформації» та переходу до кліматичної нейтральності. При цьому, обов'язковою умовою є ядерна безпека та безпечність експлуатації атомних електростанцій та їх обладнання. В Україні на сьогоднішній час частина енергоблоків закінчила свій закладений проєктний ресурс або наближається до цього, отже важливим завданням є продовження експлуатаційного ресурсу, як складової циркулярної економіки, у понадпроєктний термін забезпечивши при цьому безпеку та надійність роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зростання чисельності населення планети вимагає все більшого задоволення енергетичних потреб, а основним джерелом енергії, що використовується до цього часу, є викопні види палива. Ядерна енергія, вироблена в ядерному реакторі, використовується як конкурентний внесок з іншими джерелами електричної енергії, такими як вугілля, нафта, газ, вода та інші. Таким чином, внесок енергії з різних аспектів стає чимось, що повинно сприйматися як взаємовигідний стратегічний партнер у задоволенні майбутніх енергетичних потреб, які є економічними та екологічно чистими як на національному, так і на міжнародному рівнях [1]. Енергозбереження є нагальною потребою, щоб нація могла вижити в умовах кризи з якою зіткнулось людство. Існує 3 глобальні проблеми, пов'язані з використанням ядерної енергії, а саме: проблема "ядерної безпеки" або безпеки ядерних реакторів та обладнання енергоблоків АЕС, "ядерного нерозповсюдження" або обмежень на використання ядерних матеріалів, і "поводження з радіоактивними відходами". Що стосується питань безпеки ядерних реакторів, то оціночний ризик аварії на реакторі з високим ступенем ризику є низьким порівняно з усіма ризиками для людського життя в цілому. Ці досягнення у сфері безпеки реактора можуть бути досягнуті завдяки наполегливим зусиллям, спрямованим на підвищення і підтримку безпеки АЕС, управління безпекою і людськими ресурсами. Ядерне нерозповсюдження, пов'язане з регулюванням і обмеженням використання ядерного палива, має бути забезпечене не лише в технічних вимірах і оптимізації, але й у всіх питаннях, що стосуються міжнародної політики. Хоча кількість радіоактивних відходів на одиницю виробленої електроенергії на АЕС є відносно невеликою, токсичність радіоактивних відходів повинна бути знижена настільки, наскільки це можливо, щоб отримати краще суспільне визнання і зменшити ризик терористичних атак [2]. Отже, можна відмітити, що атомна енергетика займає важливу позицію в забезпеченні економічного сталого розвитку та потребує участі всіх зацікавлених сторін у підтримці іміджу "зеленої" енергії шляхом забезпечення безпеки експлуатації, а саме шляхом впровадження моделі "Досліджень і Розробок" на державному рівні.

Збільшення участі держави в циркулярній економіці шляхом використання моделі "Досліджень і Розробок", а саме пошук нових інновацій, розробка додатків, створення успішних прототипів, застосування технологій для забезпечення безпеки експлуатації АЕС дасть можливість до переходу за підтримкою атомної енергетики до ЄЗК.

Як зазначають автори [3, 4], політика та економіка повинні бути спрямовані на діяльність, яка сприяє створенню більш екологічного суспільства, що є економічно життєздатними. Найбільш очевидним кроком має бути заборона субсидування будь-якої діяльності, яка шкідливої для довкілля. В Україні існують широкі можливості для трансформації домінуючої моделі лінійної економіки на екологічно безпечну та економічно ефективну циркулярну модель. Розвиток циркулярної економіки в Україні може дати не лише сприятливий екологічний ефект, але й економічний ефект від підвищення енерго- та ресурсоефективності, а також соціальний ефект від створення додаткових робочих місць та отримання прибутку корпораціями у нових галузях та видах діяльності.

Розвиток циркулярної економіки в найближчому майбутньому має вирішальне значення для захисту навколишнього середовища та покращення якості життя людей, зважаючи на нераціональне використання ресурсів та негативний вплив на навколишнє середовище в результаті функціонування лінійної економіки. Впровадження та підтримка

моделі циркулярної економіки в економічній сфері приносить багато переваг нинішньому та майбутнім поколінням [5,6]. Разом з тим існує потреба в дослідженні всіх галузей промисловості, оскільки це є більш ефективним і дієвим способом впроваджувати інновації та виявляти нові ринкові можливості циркулярної економіки. Циркулярна економіка дозволить більш раціонально використовувати сировину та джерела енергії [7].

Однак, як зазначено [1-7], перехідний процес до циркулярної, «зеленої» економіки є доволі часозатратним процесом, та у енергетичній галузі потребує підтримки та відповідального забезпечення безпеки на всіх рівнях та етапах експлуатації обладнання енергооб'єктів. Питаннями забезпечення безпеки експлуатації енергообладнання у проектний та поза проектний терміни займалось багато українських дослідників, адже Україна має потужну та розвинену систему атомної енергетики.

В роботах [8-12] розглядаються питання забезпечення безпеки елементів та обладнання атомних електростанцій з різних позицій, запропоновані різні методи та підходи до технічної діагностики енергообладнання та удосконалення нормативного забезпечення щодо експлуатаційної безпеки. Авторами [12] запропоновано уніфікацію обладнання для виокремлення методів та моделей щодо оцінки технічного стану трубопровідних систем з різного типу навантаження та середі теплоносія. В роботах [8-12] також зазначається, що необхідна комплексна оцінка енергообладнання з урахуванням їх особливостей експлуатації для можливості прогнозування змiну технічного стану та терміну експлуатації у понадпроектний термін.

Метою роботи є розробка методики оцінювання технічного стану енергообладнання атомної електростанції для продовження терміну його експлуатації, що дасть можливість ефективного переходу до циркулярної економіки в рамках ЄЗК.

Виклад основного матеріалу

Прогноз змiни технічного стану при подальшій експлуатації виконується на основі аналізу деградаційних процесів і виявлення відповідності фактичних параметрів технічного стану вимогам паспортних даних та нормативних документів. Для прикладу технічної діагностики було обрано такий елемент енергообладнання як трубопровідні системи різного призначення.

Термін служби обладнання і трубопроводів блоків АЕС може бути продовжений на період, що перевищує зазначений в паспорті, на підставі розрахункових даних на міцність, що підтверджує можливість продовження терміну служби. Запропонована методика перепризначення ресурсу трубопровідних систем заснована на методології типових програм оцінки технічного стану та полягала у наступному:

- 1) визначення товщини стінок трубопроводів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на різних ділянках для виконання порівняння з розрахунковими дослідженнями на міцність;
- 2) проведення контролю механічних властивостей по твердості для трубопроводу ГЦК з метою перевірки відповідності механічних характеристик значенням, встановленим НД, і виявлення ділянок з незадовільними значеннями;

Отже, з метою отримання інформації про товщини елементів обладнання ГЦК для виконання перевірки розрахунків на міцність проведено вимірювання товщини стінок на різних ділянках трубопроводу. Дані вимірів необхідні для порівнянь отриманих значень товщини з мінімально допустимими значеннями.

Для вимірювання товщини металу трубопроводів використовувався ультразвуковий товщиномір Ут-31 з перетворювачем П112-5-12 / 2-Б-01. Точність вимірювань ультразвукового товщиноміра забезпечується наявністю функції калібрування приладу, заснованої на налаштуванні швидкості звуку і компенсації нуля при зміні типу датчика.

На рисунку 1 представлена схема розміщення датчиків для вимірювання товщини.

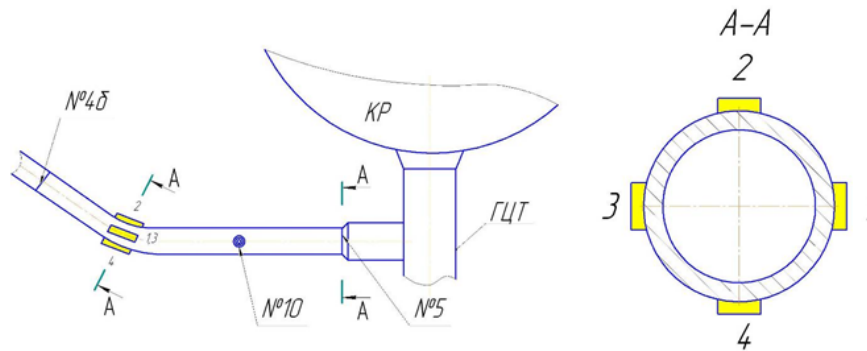


Рис. 1 – Схема розміщення датчиків для вимірювання товщини металу

Після отримання фактичних даних товщини стінки виконано порівняння отриманих значень товщини з мінімально допустимими значеннями. Дані товщини стінок основного металу і зони зварного з'єднання використані при розрахунку напружено деформованого стану ГЦК.

Основним методом контролю механічних властивостей є контроль механічних властивостей металу за твердістю (КМВТ). Контролю механічних властивостей по твердості підлягають 100% кінцевих елементів. У разі неможливості забезпечення необхідного обсягу КМВТ або в разі його негативних результатів виконуються випробування стандартних зразків, виготовлених з металу раніше заміненіх трубопроводів з напрацюванням, близькою до напрацювання обстежуваних трубопроводів даного енергоблоку АЕС. При неможливості забезпечення необхідного обсягу КМВТ і неможливості виконання випробувань стандартних зразків, повинні бути досліджені мікроразки, виготовлені з металу обстежуваних або раніше заміненіх трубопроводів.

При неможливості виконання в необхідних обсягах і / або при негативних результатах всіх вищевказаних досліджень металу рекомендується виконання компенсуючого розрахунку на міцність, що враховує фактичні умови експлуатації обстежуваних трубопроводів, а також механічні властивості їх металу, отримані шляхом екстраполяції результатів раніше виконаного контролю механічних властивостей. В іншому випадку з металу обстежуваних трубопроводів повинні бути виготовлені і досліджені стандартні зразки. При цьому, в разі неможливості повного відновлення конструкції і міцності обстежуваних трубопроводів, вони до подальшої експлуатації не допускається і повинні бути замінені.

Було проведено контроль механічних властивостей по твердості обраних ділянок трубопроводу з метою перевірки відповідності механічних характеристик значенням, встановленим НД, і виявлення окремих ділянок з незадовільними значеннями.

Твердість визначалася як середнє арифметичне значення з п'яти вимірювань в одному і тому ж місці. За результатами виміру твердості металу обраних ділянок трубопроводу дана непряма оцінка їх міцності: межа міцності R_m^T , межа плинності $R_{p0,2}^T$, відносне звуження Z^T , відносне подовження A^T . Характеристики механічних властивостей металу відповідно до вимірюваними значеннями твердості визначалися по кореляційним співвідношенням.

Межа міцності R_m^T визначалася із співвідношення через поточне значення твердості:

$$R_m^T = f(H_{max}). \quad (1)$$

Значення рівномірного подовження A^T розраховувати по діаметру поверхні контакту відповідному точці перегину:

$$A^T = f(d_{max}/D) \quad (2)$$

де $d_{max} = 2 \cdot (t_{max} \cdot D - t_{max}^2)^{1/2}$

Межа плинності визначалась як:

$$R_{p0,2}^T \cong 0,333 H_{0,2} \quad (3)$$

де $H_{0,2}$ - поточне значення твердості НВ (твердість по Брюнеллю) на межі плинності.

Для отримання даних по твердості металу був використаний твердомір динамічний ТД-32 з похибкою вимірів що не перевищує $\pm 3,0\%$. Цей твердомір дозволяє вимірювати твердість різних металів без порушення структури і цілісності об'єкту, що контролюється. Для вимірювання твердості на поверхню об'єкта проводиться механічна дія, результат якого і визначає твердість. На рис.2 представлена схема розташування місць вимірювань твердості основного металу і зварних з'єднань ГЦТ.

В результаті виконаного аналізу поточного стану ГЦТ і елементів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на відповідність вимогам НД встановлено, що по всіх контрольованих деталях і вузлах дефекти і відхилення від прийнятих норм відсутні.

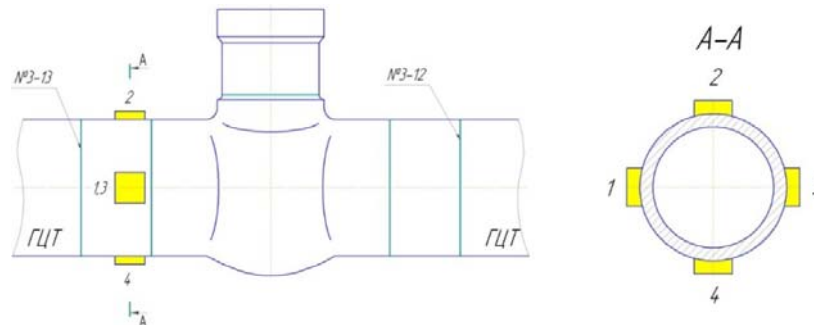


Рис. 2 – Схема розташування місць вимірювань твердості ГЦТ

Таблиця 1 – Виміряні, паспортні та мінімально допустимі по ПНАЕ Г-7-002-86 значення механічних характеристик матеріалів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК

Найменування обладнання та матеріал трубопроводу	Межа міцності R_m^T , кгс / мм ²			Межа пластичності $R_{p0,2}^T$, кгс / мм ²			Відносне подовження A^T , %		
	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86	Твердість НВ	паспортні дані	ПНАЕ Г-7-002-86
ГЦТ Петля № 3 (2YA, 302.05.00.00.000)	55,10	60,2 56,4	55,0	41,79	49,2 40,2	35,0	27,64	29,5 23,6	16,0
Головна запірна засувка (ГЗЗ) Петля №3 (2YA30S01, 970-850-E)	Для середньої частини корпусу ГЗЗ (сталь 06X12H3ДЛ)								
	85,1	75,0 82,5	65,0	60,1	50,0 65,5	50,0	27,8	24,5 24,0	12,0
	Для перехідників ГЗЗ (сталь 10ГН2МФА)								
	74,3	62,0 62,5	55,0	55,2	50,0 47,0	35,0	17,7	23,0 24,5	16,0
ГЗЗ Петля №3 (2YA30S02, 970-850-E)	Для середньої частини корпусу ГЗЗ (сталь 06X12H3ДЛ)								
	88,8	77,5 76,0	65,0	63,3	51,5 59,5	50,0	27,7	25,0 23,0	12,0
	Для перехідників ГЗЗ (сталь 10ГН2МФА)								
	79,0	60,5 63,5	55,0	58,6	45,0 46,5	35,0	17,6	26,5 27,0	16,0
Трубопровід зв'язку компенсатора об'єму (КО) з «гарячої» ниткою петлі № 4 ГЦК	55,46	59,5 58,5	55,0	42,04	44,0 39,0	35,0	27,46	25,0 22,0	16,0

Рекомендований порядок оцінки результатів контролю механічних властивостей металу наведено в позиціях 1) - 7):

1) оцінка механічних властивостей металу виконується:

- шляхом їх порівняння з результатами раніше виконаних контролів (при наявності) та / або з даними НД і паспортів;

- при відсутності вищевказаних даних - шляхом порівняння отриманих механічних властивостей з результатами раніше виконаних оцінок міцності трубопроводів за умовами, зазначеним у розділі 1.2 норм міцності ПНАЕ Г-7-002-86;

2) при відсутності даних про вихідних значення механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів можуть використовуватися:

- для основного металу - дані ТУ на виготовлення;

- для зварних з'єднань - вимоги ПНАЕ Г-7-010-89;

3) значення механічних властивостей повинні визначатися, як середнє арифметичне з окремих результатів, отриманих:

- при випробуванні окремих зразків;

- при окремих вимірах твердості.

У разі, якщо хоча б один із зазначених окремих результатів відрізняється від загальних результатів попереднього контролю механічних властивостей металу:

- по ударної в'язкості - більш ніж на 0,5 Дж / см²;

- по іншим видам випробувань - більш ніж на 5%,

загальний результат контролю механічних властивостей металу оцінюється, як зміна механічних властивостей металу трубопроводів;

4) якщо за результатами аналізу відповідно до абзацу 1 позиції 1) механічні властивості металу КЕ відповідають вихідним і / або нормативним значенням, а також - якщо зміни механічних властивостей металу знаходяться в межах похибки вимірювань, результати оцінки механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів вважаються позитивними. При цьому вимоги абзацу 2 позиції 1) можуть не виконуватися;

5) у разі невиконання умов позиції 4) виконується оцінка відповідно до абзацу 2 позиції 1);

6) результати контролю механічних властивостей металу трубопроводів вважаються позитивними, якщо:

- після виконання аналізу відповідно до абзацу 1 позиції 1) виконуються умови позиції 4);

- після порівняльного аналізу відповідно до абзацу 2 позиції 1) встановлено, що всі розглянуті умови міцності обстежуваних трубопроводів з переліку розділу 1.2 ПНАЕ Г-7-002-86 виконуються;

7) результати контролю механічних властивостей металу обстежуваних трубопроводів вважаються негативними, якщо для даної їх напрацювання встановлено істотну зміну (погіршення) механічних властивостей металу, при якому хоча б одне з розглянутих умов міцності трубопроводів може не виконається.

Аналіз результатів порівняння механічних характеристик, наведених у табл. 1, показує, що за період експлуатації ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК з 1984 р. по 2018 р. істотної зміни механічних властивостей матеріалів розглянутих трубопроводів і ГЗЗ не відбулося.

Отримані за результатами контролю твердості механічні характеристики для всіх контрольних елементів узгоджуються з паспортними значеннями і не нижче нормативних значень механічних характеристик. Деякі розбіжності в значеннях паспортних величин і виміряних пояснюються похибкою вимірювань і похибкою перерахунку механічних властивостей.

Для обґрунтування перепризначення терміну експлуатації необхідно провести оцінку міцності за значеннями напруг які не перевищують допустимих. З урахуванням даних про матеріал ГЦТ, ГЗЗ та трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК визначено значення допустимих напружень для різних розрахункових груп категорій напруг.

Для металу головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ (основний метал - сталь 10ГН2МФА): $[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}; R_{mt}^T/n_{mt}\} = \min\{55,10/2,6; 41,79/1,5\} = 21,19 \text{ кгс/мм}^2$

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при нормальних умовах експлуатації (НЕ):

$$(\sigma)_I = [\sigma], \quad (\sigma)_I = 21,19 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,3 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,3 \times 21,19 = 27,55 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_{RV} \leq (2,5 - R_{p0,2}^T/R_m^T) \cdot R_{p0,2}^T = 72,8 \leq 83,58 \text{ кгс/мм}^2$$

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при гідравлічних випробуваннях (ГВ):

$$(\sigma)_I = 1,35 \times [\sigma], \quad (\sigma)_I = 1,35 \times 21,19 = 28,61 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,7 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,7 \times 21,19 = 36,03 \text{ кгс/мм}^2$$

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ (сталь 06Х12НЗДЛ): $[\sigma] = \min\{R_m^T/n_m; R_{p0,2}^T/n_{0,2}; R_{mt}^T/n_{mt}\} = \{79,57/72,6; 55,20/1,5\} = 30,60 \text{ кгс/мм}^2$

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ при НЕ:

$$(\sigma)_I = [\sigma], \quad (\sigma)_I = 30,60 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,3 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,3 \times 30,60 = 39,78 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_{RV} \leq (2,5 - R_{p0,2}^T/R_m^T) \cdot R_{p0,2}^T = 99,70 \leq 110,4 \text{ кгс/мм}^2$$

Для корпусу головної запірної засувки ГЗЗ при ГВ:

$$(\sigma)_I = 1,35 \times [\sigma], \quad (\sigma)_I = 1,35 \times 30,60 = 41,31 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma)_2 = 1,7 \times [\sigma], \quad (\sigma)_2 = 1,7 \times 30,60 = 52,03 \text{ кгс/мм}^2$$

Оцінка міцності ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК при сейсмічних впливах виконана за умовами статичної міцності ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК від спільної дії експлуатаційних і сейсмічних навантажень.

Міцність ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК вважається забезпеченою, якщо для наступного сполучення навантажень виконується умова:

$$\text{НЕ+МРЗ (максимально-розрахунковий землетрус): } (\sigma_s)_1 \leq 1,4[\sigma]; (\sigma_s)_2 \leq 1,8[\sigma],$$

$$\text{НЕ=ПЗ (проектний землетрус): } (\sigma_s)_1 \leq 1,2[\sigma]; (\sigma_s)_2 \leq 1,6[\sigma],$$

де $[\sigma]$ - номінальне допустиме напруження.

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при НЕ+ПЗ:

$$(\sigma_s)_1 \leq 1,2 \times [\sigma] = 1,2 \times 21,19 = 25,43 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1,6 \times [\sigma] = 1,6 \times 21,19 = 33,90 \text{ кгс/мм}^2$$

Для головного циркуляційного трубопроводу ГЦТ при НЕ+МРЗ:

$$(\sigma_s)_1 \leq 1,4 \times [\sigma] = 1,4 \times 21,19 = 29,67 \text{ кгс/мм}^2$$

$$(\sigma_s)_2 \leq 1,8 \times [\sigma] = 1,8 \times 21,19 = 38,15 \text{ кгс/мм}^2$$

За результатами оцінки технічного стану елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК для основних процесів старіння обладнання і трубопроводів встановлено наступне:

- будь-яких змін форми або розмірів елементів конструкції обстежуваних ГЦТ-3, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК під дією експлуатаційних навантажень не виявлено;
- дефекти металу або утонення стінок обстежуваних ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК з початку експлуатації до проведення робіт з оцінки та перепризначення ресурсу / терміну служби зазначеного обладнання і трубопроводів не виявлено.

Результати виконаних розрахунків обстежуваних ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК на статичну і циклічну міцність, а також результати розрахунків на опір крихкому руйнуванню і на сейсмічні впливи з урахуванням коефіцієнтів запасу по міцності можуть експлуатуватися далі та не перевищують нормативних значень механічних характеристик.

Подальша експлуатація обладнання можлива при визначення допустимої кількості циклів навантаження. За результатами розрахунково-аналітичних аналізів і даними експлуатації при зареєстрованих 98 циклів допустима кількість циклів для гідровипробувань на щільність має становити 110. З урахуванням допустимої кількості циклів проведено оцінку технічного стану за міцністю трубопроводів при циклічних навантаженнях.

Розрахунковий прогноз зміни допустимого навантаження на матеріал елементів ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК в залежності від терміну експлуатації приведено на діаграмах рис. 3-5.

З метою уточнення прогнозних графіків зміни допустимого навантаження на основний метал ГЦТ, ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК в якості рекомендацій з управління старінням необхідно запланувати і виконати під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту ППР-2024 контроль металу.



Рис. 3 – Розрахунковий прогноз зміни допустимого навантаження на матеріал елементів ГЦТ



Рис. 4 – Розрахунковий прогност змiни допустимого навантаження матерiал ГЗЗ в найбільш навантаженому перерiзi «горяча» петля



Рис. 5 – Розрахунковий прогност змiни допустимого навантаження на матерiал трубопровода зв'язку КО з «горячої» ниткою петлi №4 ГЦК

На підставі результатів контролю виконати уточнений аналіз зміни механічних властивостей металу обстежуваних 2ГЦТ-3, засувки 2ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК.

Наявність результатів контролю металу обстежуваних 2ГЦТ-3, засувки 2ГЗЗ і трубопроводу зв'язку КО з «гарячої» ниткою петлі №4 ГЦК, виконаних у ППР-2024 дозволить виконати уточнений прогноз допустимого навантаження на матеріал обладнання і трубопроводів що розглядається.

Висновки

В результаті проведених досліджень запропонована методика прогнозування ресурсу енергообладнання на прикладі елементів трубопровідних систем з метою забезпечення енергетичної безпеки АЕС, як шлях до зеленої трансформації в рамках Європейського зеленого курсу що підтримує Україна. Методика включає експериментальні дослідження технічного стану енергообладнання та порівняння їх з розрахунковими та нормативними даними. Як показали експериментальні дослідження обраних ділянок трубопровідних систем:

- 1) По всіх контрольованих деталях і вузлах дефекти і відхилення від прийнятих норм відсутні, за параметрами товщини стінок та твердості металу.
- 2) В результаті оцінки міцності за значеннями напруг та виконаного аналізу поточного стану ГЦТ і елементів головного циркуляційного контуру (ГЦК) на відповідність вимогам НД встановлено, що отримані значення не перевищують допустимих.
- 3) Запропоновано розрахунковий прогноз змін технічного стану енергообладнання та рекомендації щодо уточнення прогнозованих графіків під час проведення капітального ремонту в період планово-попереджувального ремонту ППР-2024 для забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

Список використаних джерел:

1. Bogheiry A. Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics [Electronic resource] / A. Bogheiry, A. Faisal, S. Sunarno // Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia). – 2022. – № 8. – P. 488. – Access mode: <https://doi.org/10.29210/020221356> (Last accessed december 2022).
2. Black-Branch J. L. Nuclear Non-Proliferation in International Law. Vol. III. Legal Aspects of the Use of Nuclear Energy for Peaceful Purposes [Electronic resource] / J. L. Black-Branch, D. Fleck. – Hague : Springer, 2016. – 556 p. – Access mode: <https://doi.org/10.1007/978-94-6265-138-8> (Last accessed december 2022).
3. Bobrov Ye. A. Modern Innovations in the Context of the Transition to Circular Economy [Electronic resource] / Ye. A. Bobrov // Science and Innovation. – 2021. – Vol. 17, N. 6. – P. 13–23. – Access mode: <https://doi.org/10.15407/scine17.06.013> (Last accessed december 2022).
4. Подра О. П. Циркулярна економіка як детермінантна сталого розвитку та конкурентоспроможності України [Електронний ресурс] / О. П. Подра, Ю. В. Горошко // Економіка. Фінанси. Право. – 2022. – № 11. – С. 35–40. – Режим доступу: <https://doi.org/10.37634/efp.2022.11.8> (дата звернення грудень 2022).
5. Popović A. The circular economy: Principles, strategies and goals [Electronic resource] / A. Popović, V. Radivojević // Economics of Sustainable Development. – 2022. – № 6. – P. 45–56. – Access mode: DOI:10.5937/ESD2201045P (Last accessed december 2022).
6. Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries [Electronic resource] / R. Ginevičius [et al.] // Energies. – 2022. – № 15 (9). – P. 3322.
7. Circular Economy and Sustainability-Oriented Innovation: Conceptual Framework and Energy Future Avenue [Electronic resource] / V. Koval [et al.] // Energies. – 2022. – № 16. – P. 243. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/en16010243> (Last accessed december 2022).
8. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant [Electronic resource] / H. Hrinchenko [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. – Access mode: <https://doi.org/10.46813/2019-120-104> (Last accessed december 2022).
9. 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.

10. 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.
11. Borysenko V. I. Background of NPP safety parameters / V. I. Borysenko, O. O. Klyuchnykov, V. I. Pampuro // Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl. – 2011. – № 5. – Р. 6–12.
12. Грінченко Г. С. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації [Електронний ресурс] / Г. С. Грінченко [та ін.] // Машинобудування. – 2022. – № 29. – С. 62– 69. – Режим доступу: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29> (дата звернення грудень 2022).

References:

1. Bogheiry, A, Faisal, A & Sunarno, S 2022, 'Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics', *Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia*, vol. 8, no. 2, pp. 488-494, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.29210/020221356>>.
2. Black-Branch, JL & Fleck, D 2016, *Nuclear Non-Proliferation in International Law, Volume III, Legal Aspects of the Use of Nuclear Energy for Peaceful Purposes*, Springer, Hague, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.1007/978-94-6265-138-8>>.
3. Bobrov, YeA 2021, 'Modern Innovations in the Context of the Transition to Circular Economy', *Science and Innovation*, vol. 17, no. 6, pp. 13-23, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.15407/scine17.06.013>>.
4. Podra, O & Horoshko, Y 2022, 'Tsyrukuliarna ekonomika yak determinanta staloho rozvytku ta konkurentospromozhnosti Ukrainy' [Circular economy as a determinant of sustainable development and competitiveness of Ukraine], *Ekonomika. Finansy. Pravo*, no. 11, pp. 35-40, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.37634/efp.2022.11.8>>.
5. Popović, A & Radivojević, V 2022, 'The circular economy: Principles, strategies and goals', *Economics of Sustainable Development*, no. 6, pp. 45-56, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.5937/ESD2201045P>>.
6. Ginevičius, R, Trishch, R, Bilan, Y, Lis, M & Pencik, J 2022, 'Assessment of the Economic Efficiency of Energy Development in the Industrial Sector of the European Union Area Countries', *Energies*, no. 15 (9), pp. 3322.
7. Koval, V, Arsawan, W, Suryantini, S, Kovbasenko, S, Fisunen, N & Alosyna, T 2022, 'Circular Economy and Sustainability-Oriented Innovation: Conceptual Framework and Energy Future Avenue', *Energies*, no. 16, pp. 243, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.3390/en16010243>>.
8. 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.
9. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, 'Otsinka tekhnichnoho stanu truboprovodnykh system AES na vidpovidnist normatyvnykh parametrov', *Sistemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.
10. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, 'Vdoskonalennia metodyky rozrakhunku oporu krykhu komu ruinu vanni u truboprovodiv Pivdenno-Ukrainskoi AES', *Sistemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.
11. Borysenko, VI, Klyuchnykov, OO & Pampuro, VI 2011, 'Background of NPP safety parameters', *Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl*, no. 5, pp. 6-12.
12. Hrinchenko, H, Artiukh, S, Hrinchenko, V & Nehodov, S 2022, 'Unifikatsiia metodiv tekhnichnoi diahno styky truboprovodnykh system z metoiu zabezpechennia bezpechnoi ekspluatatsii', *Mashynobuduvannia*, no. 29, pp. 62-69, viewed december 2022, <<https://doi.org/10.32820/2079-1747-2022-29>>.

Стаття надійшла до редакції 26 січня 2023 року

DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84

УДК 658.562

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КВАЛІМЕТРІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ КОМПЛЕКСНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

© Буданов П.Ф., Бойко Т.Г., Грінченко Г.С., Нечуйвітер О.П., Цихановська І.В.

*Українська інженерно-педагогічна академія***Інформація про авторів:**

Буданов Павло 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.

Бойко Тарас Георгійович (Boyko Taras): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0882-2637>; e-mail: tgbo@ukr.net, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри інтелектуальної мехатроніки та роботи, вул. Кн. Романа 1/3, м. Львів, 79005, Україна.

Грінченко Ганна Сергіївна (Grinchenko Hanna): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6498-6142>; e-mail: a.kirogenko@ukr.net, кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри автоматизації метрології та енергоефективних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Нечуйвітер Олеся Петрівна (Olesia Petrivna): ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2775-8471>; e-mail: olesya@email.com, доктор фізико-математичних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, завідувач кафедри інформаційних комп'ютерних технологій і математики, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Цихановська Ірина Василівна (Tsykhanovska Iryna): ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9713-9257>; e-mail: cikhanovskaja@gmail.com, доктор технічних наук, професор, Українська інженерно-педагогічна академія, професор кафедри харчових та хімічних технологій, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

У статті показано, що для кількісного оцінювання якості об'єктів, практичне застосування знаходять різні методи кваліметрії, які можна представити у вигляді сукупності кількісних методів оцінювання і дають змогу ухвалювати найточніші, найбільш обгрунтовані рішення щодо підвищення якості об'єкта на основі оцінювання комплексних показників якості. Визначено, що в основі методів кваліметрії, для оцінки якості багатопараметричного об'єкта, мають бути закладені способи отримання інформації (інструментальний, розрахунковий, органолептичний і реєстраційний метод) та джерела отримання інформації (традиційний, експертний і соціологічний метод). Виявлено основні складнощі, пов'язані з визначенням комплексного показника оцінювання якості багатопараметричного об'єкта електроенергетики, які проявляються в особливості технологічного процесу виробництва (генерації), передачі та споживання електроенергії в режимі реального часу, а саме з теоретичними та практичними труднощами визначення реальних кількісних показників оцінювання якості обладнання технологічного процесу з виробництва електроенергії. Визначено, що при визначенні комплексного показника оцінки якості багатопараметричного об'єкту електроенергетики, важливо оцінити якість усіх процесів, що застосовуються для виробництва електроенергії, а саме: виробничий процес, як сукупність усіх дій оперативного персоналу електростанції, технічних систем та технологічного обладнання; технологічний процес, як частина виробничого процесу, що містить цілеспрямовані дії зі зміни або визначення стану електричної енергії; технологічний процес, як частина виробничого процесу, що містить цілеспрямовані дії зі зміни або визначення стану електричної енергії; технологічний процес; технологічне обладнання. Запропоновано, для визначення комплексного показника у вигляді об'єднання сукупності одиничних кількісних показників якості багатопараметричного об'єкта

електроенергетики, використати адитивний метод кваліметрії, який базується на додаванні різних властивостей оцінюваної якості об'єкта та дає змогу у математичній моделі комплексного показника відображати ієрархічну структуру врахованих властивостей, що характеризують технічний рівень та якість технологічного обладнання, виробничого та технологічного процесів. Представлено вдосконалену адитивну математичну модель у вигляді факторного аналізу, який запропоновано використовувати у випадку, коли досліджуваний (результативний показник) являє собою алгебраїчну суму факторних показників якості. Зазначено, що складність адитивної математичної моделі залежить від кількості ієрархічних рівнів обраної системи показників якості багатопараметричного об'єкта електроенергетики.

Ключові слова: оцінка, якість, процес оцінки якості, комплексний показник якості, адитивний метод кваліметрії

Budanov P., Grinchenko H., Nechuyviter O., Tsykhanovska I. “Application of qualimetry methods to evaluate complex quality indicators of multi-parameter objects”

The article shows that for the quantitative assessment of the quality of objects, various methods of qualimetry are used in practice, which can be represented as a set of quantitative assessment methods and allow making the most accurate, most informed decisions on improving the quality of an object based on the assessment of complex quality indicators. It is determined that the basis of qualimetry methods for assessing the quality of a multi-parameter object should be the methods of obtaining information (instrumental, calculation, organoleptic and registration methods) and sources of information (traditional, expert and sociological methods). The main difficulties associated with the definition of a comprehensive indicator for assessing the quality of a multi-parameter electric power facility, which are manifested in the peculiarities of the technological process of production (generation), transmission and consumption of electricity in real time, namely the theoretical and practical difficulties in determining real quantitative indicators for assessing the quality of technological equipment of the technological process of electricity production, are identified. Findings prove that when determining a comprehensive indicator for assessing the quality of a multi-parameter electric power facility, it is important to assess the quality of all processes used for electricity generation, namely production process as a set of all actions of the power plant's operational personnel, technical systems and technological equipment; technological process as part of the production process containing purposeful actions to change or determine the state of electric energy; technological process as part of the production process containing purposeful actions to change or determine the state of electric energy; technological process as part of the production process containing purposeful actions to change or determine the state of electric energy. It is proposed to use the additive method of qualimetry to determine a complex indicator in the form of a combination of a set of single quantitative indicators of the quality of a multi-parameter electric power facility, which is based on the addition of various properties of the assessed quality of the facility and allows the mathematical model of the complex indicator to reflect the hierarchical structure of the taken into account properties that characterize the technical level and quality of technological equipment, production and technological processes. The article presents an improved additive mathematical model in the form of factor analysis, which is proposed to be used for the case when the studied performance indicator is an algebraic sum of factor quality indicators. It is noted that the complexity of the additive mathematical model depends on the number of hierarchical levels of the selected system of quality indicators of a multi-parameter power engineering facility.

Keywords: assessment, quality, quality assessment process, comprehensive quality indicator, additive qualimetric method

Вступ

Нині комплексні кількісні оцінки якості дедалі більше впроваджуються в різні сфери промисловості та енергетичного комплексу. У вітчизняній [1-10] і зарубіжній [11-29] науково-технічній (науково-популярній) літературі дедалі частіше зачіпають проблеми комплексного оцінювання якості різного роду об'єктів або оцінювання якості перебігу різних процесів.

Для кількісного оцінювання якості об'єкта (продукції, систем, процесів, предметів, властивостей), практичне застосування знаходять різні методи кваліметрії [1-29].

Кваліметричні методи оцінювання якості продукції являють собою сукупність кількісних методів оцінювання і дають змогу ухвалювати найточніші, рішення щодо підвищення якості об'єкта (продукції, систем, процесів, предметів, властивостей),

Як відомо [1-29], до завдань кваліметрії належать:

- обґрунтування номенклатури показників якості;
- розробка методів визначення показників якості продукції та їх оптимізації;
- оптимізація типорозмірів і параметричних рядів виробів;
- розробка принципів побудови узагальнених показників якості;
- обґрунтування умов використання узагальнених показників якості в задачах стандартизації та управління якістю.

Кваліметрія використовує математичні методи: лінійне, нелінійне та динамічне програмування, теорію оптимального управління, теорію масового обслуговування тощо.

Кінцевою метою кваліметрії є розробка та вдосконалення методик, за допомогою яких якість конкретного оцінюваного об'єкта може бути виражена одним числом, яке характеризує ступінь задоволення даним об'єктом виробничої потреби.

Існуючі зараз методики оцінювання якості (незважаючи на те, що об'єкт оцінювання у них найрізноманітніший) характеризуються внутрішньою єдністю. Вона полягає в тому, що ці методики базуються на загальних принципах кваліметрії. Отже, з точки зору теоретичної кваліметрії, ці методики однорідні та можуть бути описані одним алгоритмом.

Тому, для удосконалення існуючих методик з оцінки якості багатопараметричних об'єктів, необхідно включати комплексні показники з урахуванням усіх процесів виробництва електроенергії, а саме: виробничий процес, як сукупність усіх дій оперативного персоналу електростанції, технічних систем і технологічного обладнання; технологічний процес, як частина виробничого процесу, яка містить цілеспрямовані дії зі зміни або визначення стану електричної енергії; технологічна система, як сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення і предметів виробництва, що дасть змогу визначити чисельні значення кількісних показників якості для оцінки якості багатопараметричного об'єкта електроенергетики.

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

Об'єктом дослідження методами кваліметрії може бути практично будь-який конструктивний і технологічний об'єкт, якщо його якість потрібно піддати кваліметричному аналізу. Однак певну актуальну проблему в оцінюванні якості викликають багатопараметричні об'єкти, які мають безліч поодиноких кількісних показників якості (наприклад, на ТЕС і АЕС від 5000 до 50000 технологічних параметрів), що ускладнює оцінювання якості об'єкта в цілому.

Актуальність проблеми ускладнюється тим, що під час оцінювання рівня якості об'єктів електроенергетики необхідно враховувати оцінку якості протікання безперервного виробничого процесу із генерування, передавання та розподілу електроенергії в режимі реального часу.

Для розв'язання цієї проблеми, у статті запропоновано розглянути застосування адитивного методу кваліметрії для оцінки комплексного показника якості багатопараметричного об'єкта електроенергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах [1-3] розглянуто: аналіз положень міжнародних документів, що містять вимоги до процесу оцінювання якості та методів вимірювань з метою визначення їхньої практичної реалізації; залежності для оцінювання показників якості промислової продукції; функції бажаності, що дає змогу враховувати максимально та мінімально допустимі значення показника якості процесу, а також його найкраще значення.

У роботах [4-6] розглянуто: сукупність залежностей між одиничними показниками якості процесів та їхніми значеннями, у безрозмірній шкалі; структурно-аналітичні моделі якості продукції як багатопараметричного об'єкта оцінювання та вимірювання для процесів формування якості виробів; переваги нейромережевого моделювання для кількісного оцінювання та інформаційного забезпечення якості; розглянуто процес оцінювання якості промислової продукції.

У роботах [7-8] розглянуто: процес оцінювання параметрів точності вимірювань не тільки за невизначеністю вимірювань, а й за іншими показниками точності; підхід до аналізу технології виробництва, що ґрунтується на близькості отриманої точності до прогнозованих параметрів, для оцінювання якості промислової продукції;

Роботу [9] присвячено розгляду математичної моделі чисельного визначення значення показника якості, що дає змогу отримувати безрозмірні значення в діапазоні від мінус нескінченності до 1.

У роботах [10-14] розглянуто: покрокову методику визначення комплексного показника оцінювання якості в галузях промисловості; фізичний сенс і розрахунки якості енергії та енергетичного класу; адаптований обчислювальний метод енергетичного рівня, що описує якість енергії з теплового та механічного погляду; підхід "TReQ" для покращення дослідницької практики в галузі енергетики та досягнення більшої прозорості, відтворюваності та якості; інструментарій для підвищення якості, прозорості та відтворюваності оцінок; методику розрахунку вартості просадки напруги [15]. Розглянуто метод для розрахунку вартості просідання напруги [15].

У роботі [16] розглянуто важливість статистичних методів для контролю якості. На оцінці параметрів і перевірці гіпотез визначено користь таких методів у вирішенні проблем при розгляді дефектних виробів.

Під час оцінювання якості електроенергії, у роботі [17], розглянуто та застосовано спрощений метод оцінювання параметрів енергетичної якості, а в роботі [18] розглянуто оптимальний алгоритм одночасного відстеження подій якості електроенергії в розподільчих системах за наявності розподіленої генерації на базі інвертора та нелінійного навантаження, а також розглянуті процедури M&V для кількісного оцінювання та порівняння енергоефективності та якості електроенергії [19].

У роботі [20] розглянуто аналіз наукових робіт, пов'язаних з оцінкою якості продукції, їхні недоліки, можливі межі застосування. Розглянуто використання математичних залежностей для отримання оцінок показників якості продукції в безрозмірному масштабі, а також запропоновано метод оцінки ризиків низької якості продукції.

Під час оцінювання якості, у роботі [21] розглянуто новий метод оцінювання якості з останнім агрегуванням для розв'язання промислових задач на основі м'яких обчислень, а в роботі [22], з урахуванням вимог міжнародної організації зі стандартизації, розглянуті вимоги до ефективного застосування системи оцінювання якості промислової продукції.

У роботах [23-24] розглянуто результати досліджень з розроблення нової методології оцінки якості визначення індивідуального ресурсу будь-яких технічних систем, а також для оцінки якості промислової продукції розглянуто застосування методу Taguchi SNR.

Під час оцінювання якості електроенергії в роботі [25] розглянуто метод, що ґрунтується на нечіткій логіці для визначення показників якості електроенергії для різних категорій споживачів електроенергії, а також розглянуто питання комплексного управління якістю електроенергії через наукову, точну та стандартизовану оцінку якості електроенергії [26] та запропоновано метод комплексного оцінювання якості електроенергії [27].

У роботі [28] розглянуто якість електроенергії в енергосистемі на основі стандартів EN-50160 та EN-61000. Представлено огляд основних методів визначення місця виникнення перешкоди в електричній мережі, а в роботі [29] розглянуто методику точного оцінювання показників якості електроенергії та підкреслено важливість послуг моніторингу якості електроенергії на різних рівнях напруги.

Метою роботи є розгляд і аналіз методів кваліметрії для їхнього застосування в наявних методиках з оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів електроенергетики.

Виклад основного матеріалу

1. Дослідження методів кваліметрії для оцінки кількісних комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів.

Розглянемо і проаналізуємо основні вимоги до методів кваліметрії для визначення кількісних комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів енергетики.

Методи кваліметрії, під час визначення чисельних значень показників якості для оцінювання об'єктів (продукції, систем, процесів, предметів, властивостей), можна розділити на дві групи:

- за способами отримання інформації (інструментальний, розрахунковий, органолептичний, реєстраційний);
- за джерелами отримання інформації (традиційний, експертний, соціологічний).

Інструментальний метод визначення чисельних значень показників якості ґрунтується на інформації, одержуваній під час використання технічних засобів вимірювань (вимірювальних приладів, систем контролю систем діагностики, інформаційно-вимірювальних систем та ін.). Вимірювальним методом визначають більшість показників якості під час оцінювання електричної енергії (наприклад, електричну напругу, електричний струм, потужність споживання, частоту напруги тощо). Основними перевагами вимірювального методу є його об'єктивність і точність, а також одержання легко відтворюваних числових значень показників якості, які виражаються в конкретних одиницях (наприклад, у ватах, вольтгах, амперах). До недоліків цього методу слід віднести складність і тривалість деяких вимірювань, необхідність спеціальної підготовки оперативного персоналу.

Органолептичний метод ґрунтується на використанні інформації, одержуваної в результаті аналізу відчуттів і сприйняття за допомогою органів чуття людини – зору, нюху, слуху, дотику, смаку. Органолептичний метод простий, завжди використовується першим, часто виключає необхідність використання вимірювального методу, як більш дорогого, вимагає малих витрат часу. Крім доступності та простоти цей метод незамінний під час оцінки таких показників якості, як запах, смак. Різновидом органолептичного методу є сенсорний, дегустаційний та інші методи.

Реєстраційний метод ґрунтується на спостереженні та підрахунку числа певних витрат (наприклад, витрат кількості електроенергії на власні потреби електростанції). Цим методом можна визначати, наприклад, кількість відмов або помилкових спрацювань

технологічного обладнання за певний період експлуатації енергоблока електростанції. Недоліком цього методу є тривалість проведення спостережень, проте дає змогу визначати показники довговічності, безвідмовності, збережуваності та ремонтпридатності.

Розрахунковий метод заснований на використанні теоретичних і емпіричних залежностей для розрахунку чисельних показників якості електроенергії, які можуть бути використані для визначення надійності, продуктивності, трудомісткості та ін.

Експертний метод визначення показників якості під час оцінки об'єкта електроенергетики, заснований на опрацюванні та аналізі інформації, яку отримано від фахівців-експертів. Сутність такого методу полягає в тому, що в основу аналізу якості електроенергії закладається думка фахівців, яка ґрунтується на їхньому професійному та практичному досвіді і виражена шляхом виставлення ними кількісних оцінок. Цей метод можна застосовувати в тих випадках, коли показники якості не можуть бути визначені іншими методами через недостатню кількість інформації або в разі необхідності розроблення спеціальних технічних засобів (наприклад, експертну групу формує всесвітня організація МАГАТЕ для вивчення та оцінки стану критичних аварійних процесів на атомній електростанції в разі важких аварій).

Соціологічний метод визначення показників якості ґрунтується на зборі та аналізі думок споживачів електроенергії. Збирання думок споживачів електроенергії здійснюється різними способами: усне опитування; поширення анкет-опитувальників, організація виставок-продажів, конференцій, аукціонів. Соціологічний метод широко використовують на стадії виконання маркетингових досліджень, під час вивчення попиту, для визначення показників якості електроенергії, оцінки якості електроенергії.

Традиційний метод передбачає отримання інформації про кількісну оцінку показників якості електроенергії з традиційних джерел інформації на електростанції (наприклад, випробувальні стенди на електростанціях, відділ технічного контролю).

Таким чином, аналіз основних методів кваліметрії засвідчив, що в якості об'єктів кваліметрії для оцінювання якості об'єкта електроенергетики слід вибирати такі процеси:

- виробничий процес: сукупність усіх дій оперативного персоналу електростанції, технічних систем і технологічного обладнання енергоблока, що необхідні на атомній або тепловій електростанції для виробництва електроенергії;
- технологічний процес: частина виробничого процесу, що містить цілеспрямовані дії зі зміни та/або визначення стану електричної енергії, на які оперативний персонал, технічні системи і технологічне обладнання впливає в процесі виробництва електроенергії;
- технологічна система: сукупність функціонально взаємопов'язаних засобів технологічного оснащення (наприклад, технологічне обладнання; засоби механізації та автоматизації технологічного процесу енергоблока); предметів виробництва і виконавців для виконання в регламентованих умовах виробництва електроенергії, заданих технологічних процесів або операцій.

Таким чином, виходячи з вище викладеного, в якості предмет кваліметрії, може бути прийнята оцінка якості електроенергії в кількісному її вираженні.

Розглянемо принципи і підходи до визначення кількісних показників оцінювання якості електроенергії, яка виробляється на об'єктах електроенергетики.

Під час вибору методів кваліметрії для оцінювання якості електроенергії, необхідне дотримання і виконання таких методологічних принципів:

- методи кваліметрії повинні давати достовірну кваліфіковану і кількісну оцінку якості багатопараметричного об'єкта дослідження;
- під час вибору кількісних показників для оцінювання якості електроенергії, необхідно завжди використовувати і враховувати пріоритет на стороні споживачів електроенергії (наприклад, величина заявленої споживаної потужності, похибки у відхиленнях величини електричної напруги і струму);

– кваліметрична оцінка якості електроенергії може бути отримана тільки з урахуванням базових значень показників визначальних властивостей і якості електроенергії загалом;

– інтегрований вищий кількісний показник у разі будь-якого узагальнення, під час оцінювання якості електроенергії, зумовлюється відповідними показниками попереднього ієрархічного рівня (наприклад, під найнижчим ієрархічним рівнем показників слід приймати одиничні показники найпростіших властивостей, що формують якість електроенергії);

– під час використання методу комплексного оцінювання якості електроенергії всі різнорозмірні показники властивостей мають бути перетворені та приведені до однієї розмірності або виражені в безрозмірних одиницях виміру;

– при визначенні комплексного показника якості електроенергії, кожен показник окремої властивості якості електроенергії має бути скоригований коефіцієнтом його вагомості (наприклад, значення коефіцієнтів вагомості запропоновано визначати на основі таких методів: вартісних регресивних залежностей; граничних і номінальних значень; еквівалентних співвідношень; статистичних; кореляційних, регресивних та експертних);

– сума числових значень коефіцієнтів вагомостей усіх показників якості на будь-яких ієрархічних етапах оцінювання має однакове значення;

– якість цілого об'єкта кваліметрії зумовлена якістю його складових частин;

– під час кількісної оцінки якості електроенергії неприпустиме використання взаємообумовлених і, отже, дублюючих показників однієї і тієї ж властивості якості електроенергії;

– оцінка якості електроенергії обов'язково має проводитися за функціями відповідно до основного її призначення.

Таким чином, усі перелічені вище методологічні принципи кваліметрії є основоположними під час розв'язання загальних і окремих науково-технічних завдань, пов'язаних із методами оцінювання якості електричної енергії, зокрема, й об'єктів електроенергетики загалом.

2. Дослідження комплексного показника оцінки якості об'єкта електроенергетики.

Комплексний показник якості дає змогу в цілому охарактеризовувати якість об'єкта або групу його властивостей.

Комплексний показник якості ділиться на:

– груповий показник якості (належить до групи властивостей об'єкта);

– інтегральний показник якості (комплексний показник якості, який відображає відношення сумарного корисного ефекту від використання об'єкта за призначенням до витрат на створення і використання об'єкта за призначенням);

– узагальнений показник якості (належить до такої сукупності властивостей об'єкта, за якою ухвалено рішення оцінювати його якість загалом).

У роботі для визначення комплексного показника, тобто для об'єднання сукупності одиничних показників оцінювання якості об'єкта електроенергетики, запропоновано використовувати найпоширеніший метод кваліметрії – адитивний, який ґрунтується на додаванні різних властивостей оцінюваної якості об'єкта.

Адитивну математичну модель можна уявити як різновид факторного аналізу, що використовується в тих випадках, коли досліджуваний (результативний показник) являє собою алгебраїчну суму факторних показників.

Адитивний метод кваліметрії дає змогу в математичній моделі комплексного показника відображати ієрархічну структуру врахованих властивостей, які характеризують технічний рівень і якість технологічного обладнання об'єкта електроенергетики.

Складність адитивної математичної моделі залежить від кількості ієрархічних рівнів обраної системи показників якості об'єкта електроенергетики.

Виходячи з цього, для об'єднання властивостей і одиничних показників оцінки якості об'єкта в групи, математична модель комплексного показника, як середньозваженої арифметичної величини, матиме вигляд, відповідно до виразу (1):

$$K = \sum_{j=1}^i M_j \cdot \sum_{i=1}^{n_j} m_{ij} \cdot K_{ij} \quad (1)$$

де t – кількість груп показників якості технологічного обладнання об'єкта електроенергетики;

M_j – коефіцієнт вагомості j -ої групи показників якості технологічного обладнання об'єкта електроенергетики;

n_j – кількість одиничних показників якості технологічного обладнання об'єкта електроенергетики, що входять до j -ї групи;

m_{ij} – коефіцієнт вагомості i -го показника j -ої групи;

K_{ij} – відносне значення i -го показника якості технологічного обладнання об'єкта електроенергетики, що входить до j -ї групи.

Якщо всередині груп властивості (показники якості технологічного обладнання об'єкта електроенергетики) розділені на підгрупи, то комплексний показник якості об'єкта електроенергетики має вже обчислюватися за формулою (2):

$$K_o = \sum_{k=1}^z M_k \cdot \sum_{j=1}^{t_k} M_{jk} \cdot \sum_{i=1}^{n_{jk}} m_{ijk} \cdot K_{ijk} \quad (2)$$

де z – кількість груп показників якості об'єкта електроенергетики;

t_k – кількість підгруп у k -ій групі показників якості об'єкта електроенергетики;

n_{jk} – кількість одиничних показників якості, що входять до j -ї підгрупи k -ої групи показників якості об'єкта електроенергетики.

Окремим випадком комплексного показника оцінки якості може виступати інтегральний показник, який визначають як відношення сумарного корисного ефекту від споживання промислової продукції до сумарних витрат на її виробництво та експлуатацію обладнання для процесу виробництва промислової продукції.

Інтегральний показник якості обчислюють за формулою (3):

$$Y = \frac{E}{(S_c + S_e)} \quad (3)$$

де E – сумарний корисний ефект від споживання промислової продукції;

S_c – сумарні витрати на придбання промислової продукції;

S_e – сумарні витрати на процес виробництва промислової продукції.

Виходячи з виразу (3), у роботі запропоновано інтегральним методом оцінювати рівень якості об'єкта електроенергетики за її інтегральним показником у тих випадках, коли встановлюють сумарний корисний ефект від споживання електроенергії та сумарні витрати на виробництво електроенергії на об'єкті електроенергетики.

Інтегральний показник оцінки рівня якості оцінюваного процесу виробництва електроенергії можна визначити як частку від ділення значення інтегрального показника якості оцінюваного процесу виробництва електроенергії на відповідне базове значення, тобто визначається виразом (4):

$$Y_{in} = \frac{P_{in}}{P_{in.b}} \quad (4)$$

де Y_{in} – інтегральний показник рівня якості оцінюваного процесу виробництва електроенергії, що оцінюється;

P_{in} – інтегральний показник якості оцінюваного процесу виробництва електроенергії, що оцінюється;

$P_{in.b}$ – базове значення інтегрального показника якості оцінюваного процесу виробництва електроенергії, що оцінюється.

Підсумковим показником рівня якості об'єкта електроенергетики, зокрема й технічного рівня процесу виробництва електроенергії, може бути не тільки інтегральний показник, а й узагальнений або комплексний, який враховує кілька різних за суттю показників, а також і головний (визначальний) показник, тобто підсумковий показник – це показник, за яким дається загальна оцінка рівня якості процесу виробництва електроенергії на об'єкті електроенергетики.

Виходячи з цього, інтегральний показник якості електроенергії можна представити як відношення сумарного показника ефекту від споживання електроенергії W до сумарних витрат на її виробництво або споживання за весь термін експлуатації об'єкта електроенергетики, тобто визначається виразом (5):

$$P_{in.ee.} = \frac{W}{(K_c + S_e)} \quad (5)$$

або як зворотне відношення цих витрат до корисного ефекту, визначається виразом (6):

$$P_{in.ee.} = \frac{(K_c + S_e)}{W} \quad (6)$$

де W – корисний ефект, тобто кількість виробленої електроенергії на об'єкті електроенергетики за певний термін експлуатації;

K_c – сумарні капіталовкладення, що включають оптову ціну, а також витрати на установку, налагодження та інші роботи на технологічному обладнанні для забезпечення процесу виробництва електроенергії за певний термін експлуатації об'єкта електроенергетики;

S_e – експлуатаційні витрати за визначений строк експлуатації об'єкта електроенергетики;

З виразу (5) випливає, що інтегральний показник для оцінювання якості багатопараметричного об'єкта характеризується корисним ефектом, що припадає на одну грошову одиницю сумарних витрат, а з виразу (6) – сумою витрат грошових одиниць, що припадають на одиницю корисного ефекту.

Висновки

Обґрунтовано основні вимоги до методів кваліметрії для визначення кількісних комплексних та інтегральних показників оцінювання якості багатопараметричного об'єкта електроенергетики та визначено способи одержання інформації для інструментального, розрахункового, органолептичного та реєстраційного методу, а також джерела одержання інформації для традиційного, експертного та соціологічного методу.

Проведено вибір адитивного методу кваліметрії, який дає змогу в математичній моделі комплексного показника відображати ієрархічну структуру врахованих властивостей, що характеризують технічний рівень і якість процесу виробництва електроенергії на об'єктах електроенергетики.

Список використаних джерел:

1. Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment / R. Trishch [et. al.] // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. – 2020. – № 1 (11). – P. 156–162. doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075
2. Quantitative assessment of working conditions in the workplace / O. Cherniak [et. al.] // *Engineering management in production and services*. – 2020. – № 12 (2). – P. 99–106. Doi: 10.2478/emj-2020-0014.
3. Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the iso 9000 series / R. Trishch [et. al.] // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. – 2016. – № 4/3 (82). – P. 18–24. Doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
4. Ginevičius G. Quantitative assessment of quality management systems' processes / G. Ginevičius, R. Trishch, V. Petraškevičius // *Economic research-ekonomska istraživanja*. – 2015. – № 28 (1). – P. 1096–1110. doi: 10.1080/1331677X.2015.1087676.
5. Зубречкая Н. А. Структурное моделирование качества продукции как многомерного объекта измерения и управления / Н. А. Зубречкая // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2015. – № 2/3 (22). – С. 44–48. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41541
6. Muelaner J. Metrology and quality assurance in industry 4.0 jody muelaner. An introduction to metrology and quality in manufacturing [Electronic resource] / J. Muelaner. – Access mode: <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/14896/An-Introduction-to-Metrology-and-Quality-in-Manufacturing.aspx> (Last accessed 02.02.2023).
7. Trishch R. Development and validation of measurement techniques according to iso/iec 17025:2017 / R. Trishch, O. Maletska, H. Hrinchenko // *Proceedings of the 8th international conference on advanced optoelectronics and lasers*. – 2019. – P. 715–720. DOI:10.1109/CAOL46282.2019.9019539
8. A general approach for tolerance control in quality assessment for technology quality analysis / O. Kupriyanov [et. al.] // *Lecture notes in mechanical engineering*. – 2022. – P. 330–339. DOI:10.1007/978-3-031-16651-8_31
9. Mathematic model of the general approach to tolerance control in quality assessment / O. Kupriyanov [et. al.] // *Lecture notes in mechanical engineering* this link is disabled. – 2022. – P. 415–423. DOI:10.1007/978-3-030-91327-4_41
10. Trishch R. Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry / R. Trishch, O. Kupriyanov, O. Cherniak // *Engineering management in production and services* this link is disabled. – 2021. – № 13 (2). – P. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0016>
11. Ruihua C. Energy quality and energy grade: concepts, applications and prospects / C. Ruihua, X. Weicon, D. Shuai // *Oxford open energy*. – 2022. – Vol. 1. – P. 12–20. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oia001>
12. Jiang X. Adapted computational method of energy level and energy quality evolution for combined cooling, heating and power systems with energy storage units / X. Jiang, X. Wang, L. Feng // *Energy*. – 2017. – P. 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.124>
13. Huebner G. Improving energy research practices: guidance for transparency, reproducibility and quality / G. Huebner, M. Fell, N. Watson // *Buildings and cities*. – 2021. – Vol. 2. – P. 1–20. DOI: <http://doi.org/10.5334/bc.67>
14. Huebner G. Are we heading towards a replicability crisis in energy efficiency research? A toolkit for improving the quality, transparency and replicability of energy efficiency impact evaluations [Electronic resource] / G. Huebner, M. Nicolson, M. Fell // *Proceedings of the european council for an energy efficient economy ecee 2017 summer study on energy efficiency: consumption, efficiency and limits*. – London : UKERC, 2017. – Access mode: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1561512/> (Last accessed 30.01.2023).
15. Sharma A. A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation / A. Sharma, B. Rajpurohit, S. Singh // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2018. – Vol. 88. – P 363–372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>
16. Francisco J. Importance of quality control implementation in the production process of a company / J. Francisco, E. Rosillo, F. Javier // *European Journal of Economics and Business Studies*. – 2018. – Vol. 4, no. 1. – P. 2–6. DOI: <https://doi.org/10.26417/ejes.v10i1.p248-252>
17. Lucchi E. Simplified assessment method for environmental and energy quality in museum buildings / E. Lucchi // *Energy and buildings*. – 2016. – Vol. 117. – P. 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.037>
18. Karimian A. Novel method based on Teager Energy Operator for online tracking of power quality disturbances / A. Karimian, S. Hosseinian // *Electric power systems research*. – 2022. – Vol. 13. – P. 108747. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108747>
19. Energy and power quality measurement for electrical distribution in AC and DC microgrid buildings / L. Daniel [et. al.] // *Applied energy*. – 2022. – Vol. 308. – P. 118308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118308>
20. Qualimetric method of assessing risks of low quality products / R. Trishch [et. al.] // *MM science journal*. – 2021. – № 10. – P. 4769–4774. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87679>

21. Gitinavard H. Soft computing-based new interval-valued hesitant fuzzy multicriteria group assessment method with last aggregation to industrial decision problems / H. Gitinavard, S. Mousavi, B. Vahdani // *Soft comput.* – 2017. – Vol. 21. – P. 3247–3265. DOI: 10.1007/s00500-015-2006-9
22. ISO 9001:2015 quality management systems. Requirements. International organization for standardization [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (Last accessed 10.02.2023).
23. Development of the method for predicting the resource of mechanical systems / A. Panda [et. al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – Vol. 105. – P. 1563–1571. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04252-6>
24. Tang M. An improved Taguchi multi-criteria decision-making method based on the hesitant fuzzy correlation coefficient and its application in quality evaluation / M. Tang, T. Wang, D. Peng // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing.* – 2020. – № 12. – P. 8241–8254. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02558-y>
25. Jiansheng H. Power quality assessment of different load categories / H. Jiansheng, J. Zhuhan // *CPESE : 4th international conference on power and energy systems engineering.* – 2017. – Vol. 141. – P. 345–351. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.041>
26. Research on power quality evaluation method for high energy-consuming enterprises / Y. Liu [et. al.] // *Journal of physics: conference series. International conference on mechanical engineering, intelligent manufacturing and automation technology (memat).* – 2021. – Vol. 1820. – P. 15–17. DOI 10.1088/1742-6596/1820/1/012005
27. Canran S. Power quality comprehensive evaluation method based on fuzzy mathematics and cloud theory / S. Canran, H. Lanxin // *Journal of physics: conference series. International conference on mechanical engineering, intelligent manufacturing and automation technology (memat).* – 2020. – Vol. 1684. – P. 18–20. DOI 10.1088/1742-6596/1684/1/012136
28. Techniques to locate the origin of power quality disturbances in a power system: a review / R. Martínez [et. al.] // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14. – P. 7428. <https://doi.org/10.3390/su14127428>
29. Panagiotis A. Power quality monitoring and evaluation in power systems under non-stationary conditions using wavelet packet transform / A. Panagiotis, S. Pavlos // *Selected papers from the 2018 IEEE international conference on high voltage engineering and application.* – 2018. – P. 186–196. doi: 10.1049/hve.2019.0062.

References

1. Trishch, R, Maletska, O, Cherniak, O, Semionova, Ju & Jancis, V 2020, ‘Analysis of the requirements of international and national standards for measurement methods and metrological equipment’, *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, no. 1 (11), pp. 156-162. doi: 10.30837/2522-9818.2020.12.075
2. 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. doi: 10.2478/emj-2020-0014.
3. Trishch, R, Gorbenko, E, Dotsenko, N, Kim, N & Kiporenko, A 2016, ‘Development of qualimetric approaches to the processes of quality management system at enterprises according to international standards of the ISO 9000 series’, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 4/3 (82), pp. 18-24. doi: 10.15587/1729-4061.2016.75503.
4. Ginevičius, R, Trishch, H & Petraškevičius, V 2015, ‘Quantitative assessment of quality management systems’ processes’, *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, no. 28 (1), pp. 1096-1110. doi: 10.1080/1331677X.2015.1087676.
5. Zubretskaya, N 2015, ‘Structural modeling of product quality as a multidimensional object of measurement and management’, *Technological Audit and Production Reserves*, no. 2/3 (22), pp. 44-48. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.41541
6. Muelaner, J 2017, *Metrology and Quality Assurance in Industry 4.0 Jody Muelaner. An Introduction to Metrology and Quality in Manufacturing*, viewed 02 February 2023, <<https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/14896/An-Introduction-to-Metrology-and-Quality-in-Manufacturing.aspx>>.
7. Trishch, R, Maletska, O & Hrinchenko, H 2019, ‘Development and validation of measurement techniques according to ISO/IEC 17025:2017’, *Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers*, pp. 715-720. DOI:10.1109/CAOL46282.2019.9019539
8. Kupriyanov, O et. al. 2022, ‘A general approach for tolerance control in quality assessment for technology quality analysis’, *Lecture notes in mechanical engineering*, pp. 330-339. DOI:10.1007/978-3-031-16651-8_31
9. Kupriyanov, O et. al. 2022, ‘Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment’, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* *this link is disabled*, pp. 415-423. DOI:10.1007/978-3-030-91327-4_41
10. Trishch, R, Kupriyanov, O & Cherniak, O 2021, ‘Methodology for multi-criteria assessment of working conditions as an object of qualimetry’, *Engineering Management in Production and Services* *this link is disabled*, no. 13 (2), pp. 107-114. DOI: <https://doi.org/10.2478/emj-2021-0016>

11. Ruihua, C, Weicong, X & Shuai, D 2022, 'Energy quality and energy grade: concepts, applications and prospects', *Oxford open energy*, vol. 1, pp. 12-20. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiac001>
12. Jiang, X, Wang, X & Feng, L 2017, 'Adapted computational method of energy level and energy quality evolution for combined cooling, heating and power systems with energy storage units', *Energy*, pp. 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.124>
13. Huebner, G, Fell, M & Watson, N 2021, 'Improving energy research practices: guidance for transparency, reproducibility and quality', *Buildings and cities*, vol. 2 (1), pp. 1-20. DOI: <http://doi.org/10.5334/bc.67>
14. Huebner, G, Nicolson, M & Fell, M 2017, 'Are we heading towards a replicability crisis in energy efficiency research? A toolkit for improving the quality, transparency and replicability of energy efficiency impact evaluations', *Proceedings of the european council for an energy efficient economy eceee 2017 summer study on energy efficiency: consumption, efficiency and limits*, UKERC, London, viewed 30 January 2023, <<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1561512/>>.
15. Sharma, A, Rajpurohit, B & Singh, S 2018, 'A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation', *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 88, pp. 363-372. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.011>
16. Francisco, J, Rosillo, E & Javier, F 2018, 'Importance of quality control implementation in the production process of a company', *European Journal of Economics and Business Studies*, vol. 4, no. 1. pp. 2-6. DOI: <https://doi.org/10.26417/ejes.v10i1.p248-252>
17. Lucchi, E 2016, 'Simplified assessment method for environmental and energy quality in museum buildings', *Energy and buildings*, vol. 117, pp. 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.037>
18. Karimian, A & Hosseinian, S 2022, 'Novel method based on Teager Energy Operator for online tracking of power quality disturbances', *Electric power systems research*, vol. 13, pp. 108747. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108747>
19. Daniel, L, Omkar, A, Moazzam, N & Willy, G 2022, 'Energy and power quality measurement for electrical distribution in AC and DC microgrid buildings', *Applied energy*, vol. 308, pp. 118308. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118308>
20. Trishch, R, Nechuiviter, O, Dyadyura, K, Vasilevskyi, O, Tsykhanovska, I & Yakovlev, M 2021, 'Qualimetric method of assessing risks of low quality products', *MM science journal*, no. 10, pp. 4769-4774. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87679>
21. Gitinavard, H, Mousavi, S & Vahdani, B 2017, 'Soft computing-based new interval-valued hesitant fuzzy multicriteria group assessment method with last aggregation to industrial decision problems', *Soft comput*, vol. 21, pp. 3247-3265. DOI: 10.1007/s00500-015-2006-9
22. International Organization for Standardization 2015, *Quality management systems. Requirements. International organization for standardization*, ISO 9001:2015, viewed 10 February 2023, <<https://www.iso.org/standard/62085.html>>
23. Panda, A et al. 2019, 'Development of the method for predicting the resource of mechanical systems', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 1563-1571. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04252-6>
24. Tang, M, Wang, T & Peng, D 2020, 'An improved Taguchi multi-criteria decision-making method based on the hesitant fuzzy correlation coefficient and its application in quality evaluation', *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, no. 12, pp. 8241-8254. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02558-y>
25. Jiansheng, H & Zhuhan, J 2017, 'Power quality assessment of different load categories', *CPESE 4th international conference on power and energy systems engineering*, vol. 141, pp. 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.041>
26. Liu, Y, Junde, L, Yang, B, Liaoyi, N, Xiangbo, Z, Xue, W & Shenghua, B 2021, 'Research on power quality evaluation method for high energy-consuming enterprises', *Journal of physics: conference series. International conference on mechanical engineering, intelligent manufacturing and automation technology (memat)*, Guilin, vol. 1820, pp. 15-17. DOI 10.1088/1742-6596/1820/1/012005
27. Canran, S & Lanxin, H 2020, 'Power quality comprehensive evaluation method based on fuzzy mathematics and cloud theory', *Journal of physics: conference series. International conference on mechanical engineering, intelligent manufacturing and automation technology (memat)*, Shanghai, vol. 1684, pp. 1-20. DOI: 10.1088/1742-6596/1684/1/012136
28. Martínez, R, Castro, P, Mañana, M & Arroyo, A 2022, 'Techniques to locate the origin of power quality disturbances in a power system: a review', *Sustainability*, vol. 14, pp. 7428. <https://doi.org/10.3390/su14127428>
29. Panagiotis, A & Pavlos, S 2018, 'Power quality monitoring and evaluation in power systems under non-stationary conditions using wavelet packet transform', *Selected papers from the 2018 IEEE international conference on high voltage engineering and application*, pp. 186-196. doi: 10.1049/hve.2019.0062.

Стаття надійшла до редакції 03 лютого 2023 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 – вимірвальна техніка.

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

Публікаційна етика та правила оформлення наукових публікацій

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

Опубліковані в Збірнику наукових праць 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 англomовних користувачів. Тому можете вводити до анотації спеціальні терміни. Слід чітко викладати свою позицію. Від стилю її викладення залежить кількість звертань і, що є особливо важливим і актуальним сьогодні, кількість цитувань Вашої публікації. Анотація не повинна містити загальних слів.

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

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

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

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

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

Обсяг тексту повинний бути 1800 знаків.

Приклад авторського резюме українською мовою:

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

Рекомендації до написання тексту наукової статті

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

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

Особливості стилю наукової статті

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

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

Рекомендації до складання списку використаних джерел

Після статті подається 2 списки:

Список використаних джерел (звичайний список літератури) та **References** (список для міжнародних БД, де дані українською/російською мовою описуються за допомогою транслітерації (<https://slovnyk.ua/translit.php>), а джерела англійською дублюються зі списку «Список використаних джерел»). Необхідно в опис документу в Списку та References вносити всіх авторів, не скорочуючи перелік до трьох, як це рекомендовано чинним у нас державним стандартом.

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

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

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

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

Приклад опису статті з журналу:

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

Приклад опису книги:

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

ДЛЯ ПОДАТОК

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 30. – Харків, Українська інженерно-педагогічна академія (УІПА), 2022. – 92 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 30. – Kharkiv, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy (UEPA), 2022. – 92 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 18.03.2023, Формат 60×84 ¹/₈. Умов. друк. арк. – 6,6.
Гарнітура *Times New Roman*. Друк цифровий. Наклад 50 прим. Ціна договірною.

Віддруковано в ТОВ «Оберіг»

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

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