ISSN 2079-1747 (print)

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

МАШИНОБУДУВАННЯ

Випуск 34

ENGINEERING

Issues 34

Харків
Kharkiv
2024

Засновник і видавець
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України

Наукове фахове видання України Категорії «Б» з галузях наук:
13 Механічна інженерія за спеціальностями:
131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування
(наказ МОН України №409 від 17.03.2020)
15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю:
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка (наказ МОН України №320 від 07.04.2022).

Засновано у 2007 році
Періодичність виходу – 2 рази на рік

УДК 621+624+681.5+006.9

У збірнику подано результати наукових досліджень у галузі механічної обробки сучасних матеріалів із застосуванням високопродуктивних технологій, високоефективних ріжучих інструментів, нових методів і вимірювальних приладів для контролю якості оброблених поверхонь, метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Для науковців, аспірантів, викладачів, фахівців у галузі прикладної механіки, матеріалознавства, галузевого машинобудування, метрології та інформаційно-вимірювальної техніки.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна
(протокол 26 від 23.12.2024 р.)

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

Адреса редакційної колегії: Україна, 61003, м. Харків, вул. Університетська, 16, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія», головний корпус, кім. 207.
Тел. (057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua, сайт: https://periodicals.karazin.ua/engineering (OJS)

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за достовірність наведених фактів, імен тощо.

Статті пройшли подвійне «сліпе» рецензування

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб`єктів у сфері медіа: R30-02387 (Рішення No 1820 від 21.12.2023 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення. Протокол No 31)

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, оформлення, 2024

Founder and Publisher
V.N. Karazin Kharkiv National University
Ministry of Education and Science of Ukraine

The Collection is a professional publication in the field of sciences
13 Mechanical Engineering, by specialties:
131 Applied Mechanics; 132 Materials Science; 133 Industrial Mechanical Engineering
(order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 409 від 17.03.2020)
15 Automation and Instrumentation by specialty:
152 Metrology and Information and Measuring Equipment
(order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 320 dated 07.04.2022).

Established in 2007
Published 2 times a year

UDC 621+624+681.5+006.9

The collection presents the results of scientific research in the field of mechanical processing of modern materials using high-performance technologies, new methods and measuring devices for quality control of machined surfaces and high-performance cutting tools, metrology and information and measuring technology.

For scientists, postgraduate students, teachers, specialists in the field of applied mechanics, materials science, industrial mechanical engineering, metrology and information and measuring technology.

Approved for printing by the decision of the Academic Council of V. N. Karazin Kharkiv National University
(Minutes Nr 26, dated December 23, 2024)

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

Editorial Board Address: 16 Universitetska str., 61003, Kharkiv, V.N. Karazin Kharkiv National University, Educational and Research Institute "Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy", main building, office 207.
Tel (057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua web: https://periodicals.karazin.ua/engineering (OJS)

The authors of the published materials are solely responsible for the selection, accuracy of the facts, proper names, etc

Double-Blind Peer Review Was Conducted.

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-02388
(Decision No 1820 dated December 21, 2023 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, Protocol No 31)

© V.N. Karazin Kharkiv National University, design, 2024

ЗМІСТ

МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Соловей І. М., Кузнєцов В. Д., Черняк К. М., Малахов І. В., Ромашкін Д. Д, Компанець В. В.
Вплив електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта на його аеродинамічні характеристики **6**

Грінченко Г. С., Кіпоренко О. В., Негодов С. С., Лисенко А. Я., Мазорчук К. К., Нос Р. С.
Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств **17**

Грінченко Г.С., Грінченко В. В., Козлов М. С., Герасимов Є. В., Захаров С. О., Теслов О. А.
Оцінювання якості механічного оброблення шляхом визначення закону розподілу точності **31**

Грінченко Г. С., Мацько А. М.
Інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології освіти **39**

Овчаров О. О., Котелевець К. А.
Підходи до ефективного інженерного управління якістю забезпечення безпеки енергетичних обєктів **51**

Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Фурсова Т. М., Чирочкін Д. О., Єпік О. М
Шляхи підвищення показників якості (теплової економічності) електростанцій **61**

Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Вітер В. С., Малюта В. Є., Насиров С. В.
Аналіз показників якості електростанцій при модернізації **72**

Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Василець Т. Ю., Цвєткова-Канюк А. О., Толсторебров О. Т.
Декомпозиція техніко-економічних показників якості енергоблоків електростанцій **82**

Буданов П. Ф. Купріянов О. В., Мельников В. Є., Кононов В. Б.
Кваліметричний метод для оцінки кількісних та якісних параметрів сонячного елемента **92**

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Трачук Є. В., Швед М. П.
Методи регулювання якості змішування при переробці полімерів на дисковому екструдері **104**

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Скоркіна В. О., Старченко В. В.
Особливості процесу плоского шліфування деталей із загартованих легованих сталей **116**

Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Князєва В. М., Кисла Д. С., Шофул К. А.
Імпрегнування абразивного інструменту як метод підвищення результативності шліфування **125**

CONTENTS

METROLOGY AND INFORMATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES

Solovei I., Kuznietsov V., Cherniak K., Malakhov I., Romashkin D., Kompanets V.
Influence of electrostatic water-repellent coating of the propeller blades on its aerodynamic characteristics **6**

Hrinchenko H., Kiporenko O., Nehodov S., Lysenko A., Mazorchuk K., Nos R.
Development of a regulatory approach to risk assessment of energy utilities **17**

Hrinchenko H., Hrinchenko V., Kozlov M., Zakharov S., Herasymov Ye., Teslov O.
Assessment of machining quality by determining the law of accuracy distribution **31**

Matsko A., Hrinchenko H.
Integration of qualimetric approaches into modern educational information measurement technologies **39**

Ovcharov, O., Kotelevets, K.
Approaches to effective engineering quality management of safety assurance of energy facilities **51**

Kanjuk G., Mezerya A., Fursova T., Chyrochkin D., Epik O.
Ways of increase indicators of quality (heat economy) of power plants **61**

Kanjuk G., Mezerya A., Viter V., Maliuta V., Nasyrov S.
Analysis of quality indicators of power plants during modernization **72**

Kanjuk G., Mezerya A., Vasilets T., Tsvetkova-Kanyuk A., Tolstorebrov O.
Decomposition of technical and economic quality indicators of power plants **82**

Budanov P., Kupriyanov O., Melnykov V., Kononov V.
Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell **92**

INDUSTRIAL ENGINEERING

Trachuk Y., Shved M.
Methods of mixing quality control during polymer processing on a disk extruder **104**

MATERIALS SCIENCE

Skorkin A., Kondratyuk O., Skorkina V., Starchenko V.
Features of the process of flat grinding of parts made of hardened alloy steels **116**

Skorkin A., Kondratyuk O, Kniazieva V, Kisla D, Shoful K.
Impregnation of abrasive tools as a method of improving grinding results **125**

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-01
УДК 629.735

[1]**SOLOVEI I.,** candidate of technical sciences,
associate professor of Department of Electrical Technologies and Power Equipment Operation
e-mail: iwan70@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4715-3795
[2]**KUZNIETSOV V.,**
postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: v.kuznietsov@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1145-9281
[2]**CHERNIAK K.,**
postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: k.m.cherniak@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9225-9498
[2]**MALAKHOV I.,**
postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: i.m.malakhov@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5540-4840
[2]**ROMASHKIN D.,**
postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: d.d.romashkin@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1410-4306
[2]**KOMPANETS V.,**
postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: v.v.kompanets@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6016-0244
[1]*Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute",*
Berezhany, 47501, Ukraine
[2]*National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*
17 Vadyma Manka st., Kharkiv, 61070, Ukraine

INFLUENCE OF ELECTROSTATIC WATER-REPELLENT COATING OF THE PROPELLER BLADES ON ITS AERODYNAMIC CHARACTERISTICS

The article presents approaches to the development of a methodology for improving the main aerodynamic characteristics of fixed and variable pitch propellers. The aim of the work is to improve the main aerodynamic characteristics of fixed and variable pitch propellers by applying an electrostatic water-repellent coating to the surface of the blades. The article solves the following tasks: analysis of the main ways to improve the aerodynamic characteristics of an air rotor when using a surface coating that provides improvement of its aerodynamic characteristics, substantiation of the method of reducing the drag of an air rotor, study of the proposed method of reducing the drag of an air rotor when applying an electrostatic water-repellent coating to its blades. The following methods are used: comparative analysis, experimental study.

The results obtained make it possible to reduce the drag of an air rotor and improve its aerodynamic characteristics, which makes it possible to increase the efficiency of the propeller group and improve its fuel and economic performance. The use of an electrostatic water-repellent coating on the blades of an air rotor makes it possible to improve its aerodynamic characteristics and increase the efficiency of the propeller group. The results of experimental studies have shown that when applying such a coating to the blades of an air rotor, it is possible to obtain greater thrust by reducing its drag and improve the fuel and economic performance of the propeller unit, namely, reduce fuel consumption.

KEYWORDS: *surface quality, screw surface quality assessment, propeller, propeller blade, propeller coating, propeller aerodynamic characteristics.*

In cites: Solovei I., Kuznietsov V., Cherniak K., Malakhov I., Romashkin D., Kompanets V**.** (2024). Influence of electrostatic water-repellent coating of the propeller blades on its aerodynamic characteristics. *Engineering*, (34), 6-16. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-01

© Solovei I., Kuznietsov V., Cherniak K., Malakhov I., Romashkin D., Kompanets V., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Statement of the problem

The coating of propellers is an important aspect of the aviation industry and has a major impact on the efficiency, durability and safety of aircraft. Propellers operate in difficult conditions and are exposed to extreme temperatures, high loads, vibrations and corrosion. Therefore, the coating applied to their surface must provide protection and reduce wear and tear and increase their efficiency. The efficiency of a propeller largely depends on the correct selection of its parameters, design, and surface coating of its blades [1, 2].

Regardless of the type of propeller (metal, composite, or other materials), the coating always plays a key role in ensuring their long-term use and flight safety. Properly selected and applied coatings can significantly improve the performance of aircraft.

The quality of the propeller surface coating determines the degree of corrosion protection, since the propeller is often exposed to moisture and other aggressive environments. The propeller surface coating also protects against erosion due to dust and sand particles that hit the blade surface during flight and gradually wear out the surface [3, 4]. The applied coating with a low friction coefficient reduces the drag of the rotor, while improving its aerodynamic properties. And heat-resistant coatings can withstand high temperatures without losing their properties [5]. An innovative technological solution is nanocoatings, which, thanks to new technologies, allow for the application of ultrathin layers of nanocoatings, which, due to their improved aerodynamic properties, not only provide protection against erosion and corrosion, but also reduce airflow resistance.

A properly selected and applied coating can significantly improve the performance of a rotorcraft. For example, reduced drag and erosion contribute to maintaining the optimal blade shape, which ensures flight stability and reduces engine load, as well as improves the economic performance of the rotorcraft.

Modern methods of approaching the selection and application of coatings on the surface of an air rotor can significantly improve the performance of aircraft, which necessitates a comparative analysis of the latest advances in this important area and a comprehensive review of existing methods of air rotor surface treatment. Thus, there is a need to justify the use of an electrostatic water-repellent coating of the propeller surface.

Analysis of recent studies and publications

Currently, many scientific studies are being conducted to improve the efficiency and reliability of propellers [6-8]. Innovations in the industry include the use of nanomaterials, composite alloys, and more environmentally friendly coatings that open up new opportunities to improve the efficiency and reliability of aircraft components.

Nanocoatings are typically single- or multi-phase solid structures deposited on an overlaying surface with a thickness of about 100 nm or less, adding certain properties or functions to the material. Different materials exhibit unique properties at the nanoscale, such as melting point, electrical conductivity, magnetic permeability, hydrophobicity, and chemical reactivity to erosion and corrosion, but also reduce airflow resistance due to improved aerodynamic properties [9-11]. The effectiveness of the process of surface protection based on nanotechnology specially designed for aeronautical applications on aircraft made of composite materials is described in [12-14].

Sources [15, 16] consider issues related to the aerodynamic design of propeller blades; provide basic information on the vortex theory of a propeller; present a method for accounting for terminal losses; consider a method for solving propeller aerodynamics problems and performing a calculation check; analyze the issue of choosing the most profitable propeller with an infinite and finite number of blades; propose methods and algorithms for aerodynamic design of propeller blades.

Since aerodynamic characteristics are important quality indicators, we analyzed scientific publications on the principles and methods of quality assessment. For example, publications [17-19] present a methodology for applying qualimetric methods for evaluating various objects using nonlinear functional dependencies. Scientific publications [20, 21] present a methodology for quality assessment

in mechanical engineering, which presents the optimization of tolerances for the quality and accuracy of machine parts.

Researchers at the Institute of Aeronautics at Riga Technical University [22] have developed a multilayer metal-ceramic nanocoating called McBLADE, which can be used to protect compressor and turbine blades in modern titanium alloy jet engines. Each layer of the coating is extremely thin and performs a specific function. The first layer increases adhesion to the base material, and the second layer protects the titanium alloy from oxidation. The top layer provides thermal protection and abrasion resistance, which allows the components to operate at high temperatures.

Paper [23] presents a methodology for using an aircraft surface de-icing coating to reduce the labor intensity and cost of performing work in the cold season. De-icing aircraft in cold weather can be an expensive and time-consuming process. Nanocoatings have been developed that can repel water and ice, resulting in maintenance cost savings. In-flight tests on British Airways' Airbus A320 aircraft have demonstrated a 20-40% improvement in surface hydrophobicity compared to other commercially available conventional coatings. In addition, innovative coatings based on nanostructured carbon materials (such as carbon nanotubes and graphene oxide) reduce airflow resistance on the aircraft surface. This reduces fuel consumption and CO2 emissions.

A research project called ReSiSTant (Large Riblet Surface with Super Hardness, Mechanical and Temperature Resistance by nanofunctionalization) [24], funded by the EU's Horizon 2020 research and innovation program, aimed to develop advanced nanocoatings and application methods to improve performance and provide abrasion and corrosion resistance. The project focuses on ribbed surfaces consisting of very small (2-100 microns) parallel grooves to reduce passive surface drag in next-generation aircraft.

Paper [25] presents materials on computational and experimental studies of the propeller layout using numerical research methods. The use of new methods for reducing passive drag in aviation is one of the most viable approaches to reducing aviation fuel consumption, CO2 emissions, and noise generation.

Thus, the aim of the article is to improve the main aerodynamic characteristics of fixed and variable pitch propellers by applying an electrostatic coating on the surface of the blades.

Summary of the main material

Currently, considerable attention is devoted to mathematical methods for modeling the dynamics of fluids and gases, which allow replacing costly physical experiments with numerical simulations with a high degree of reliability. In many cases, these methods yield results that are unattainable through physical experimentation.

The properties of a material at the nanoscale are governed by intermolecular forces such as the Van der Waals interaction, hydrogen bonds, and electrostatic forces. These intermolecular forces operate on small length scales in the range of a few angstroms to a few nanometers. When the dimensions of the material become the same as the distances between the molecular forces (i.e., nanoscale), the material properties change dramatically [26]. Thus, coatings consisting of nanoparticles or multiple layers at the nanoscale make it possible to explore their improved physical and chemical properties in a wide range of new applications.

When the surface of a propeller interacts with an incoming air stream, it is necessary to create the least resistance, since the particles of the solid surface of the propeller will collide with particles of air molecules. It is well known that in heterogeneous systems, intermolecular interaction within a phase and between phases is distinguished. Electrostatic repulsion is a consequence of the Coulomb interaction between equally charged objects. This phenomenon is fundamental to understanding the behavior of materials in heterogeneous systems, such as colloidal solutions, biopolymers, and nanoparticles. Its control allows us to create functional materials and devices [27].

The interaction of atoms and molecules within a single phase is called cohesion (from the Latin cohesion) [28, 29]. It determines the existence of substances in the condensed state

and can be caused by interatomic and intermolecular interactions of different nature (chemical covalent bonds, hydrogen bonds, electrostatic interaction forces, Van der Waals forces). Cohesive forces are sometimes called attraction forces. Van der Waals forces arise from the interaction of short-term dipoles and this bond is considered the weakest of all types of bonds. A short-term asymmetric distribution of charges is a temporary dipole. This dipole can polarize neighboring molecules and thereby induce new dipoles.

The ability to polarize depends on the total number of electrons in the molecule. The larger the molecule, the greater the number of electrons and the greater the intramolecular charge shifts that can occur. As a result, many short-term partial electric charges (instantaneous dipoles) are created, which create an electric field, under the influence of which electrostatic forces (forces of interaction between two charged particles) arise, causing the attraction or repulsion of individual dipoles. The larger the molecule of a substance, the more Van der Waals interactions between molecules. The work of cohesion is directly proportional to the energy of formation of two surfaces [28]:

$$W_k = 2\sigma, \tag{1}$$

where σ – surface tension of the surface.

The interaction between phases or brought into contact surfaces of condensed bodies of different nature is called adhesion, which provides a certain strong connection between two bodies due to physical or chemical intermolecular forces. Taking into account the adhesion between two liquids, between a liquid and a solid, and between two solids and air, adhesion occurs when the system wants to reduce the surface energy, so under appropriate conditions it is a spontaneous process. The adhesion work W_a characterizes the strength of the adhesive contact and is determined by the reverse breaking work of this contact per unit area, and is measured in the same units as the surface tension, J/m^2. Let's consider the diagram of the change in interfacial surface tension, Fig. 1.

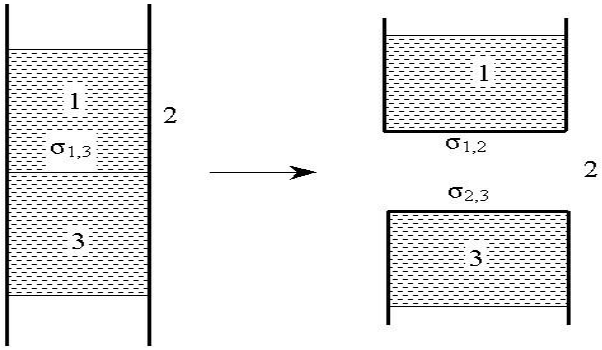


Fig. 1 - Diagram of changes in interfacial surface tensions during the separation of liquids 1 and 3, which do not mix in a gas medium 2 [24]

To obtain the relationship between the work of adhesion and surface tension, consider two liquid bodies 1 and 3 in contact with each other over an area S in a gas atmosphere 2 (Fig. 1) and characterized by an interfacial surface tension $\sigma_{1,3}$. When the contacting liquids are separated, two surfaces are obtained: liquid 1 with a surface tension of $\sigma_{1,2}$ and liquid 3 with a surface tension of $\sigma_{2,3}$, and the interface with a surface tension of $\sigma_{1,3}$ disappears. Thus, the work of adhesion, i.e., the work required to separate a unit surface area of one liquid from the other, according to the Dupré equation, will be determined by [28]:

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{2,3} - \sigma_{1,2}, \tag{2}$$

where $\sigma_{1,2}$ – surface tension at the liquid-gas interface; $\sigma_{2,3}$ – solid body - gas; $\sigma_{1,2}$ – and a solid body is a liquid.

Equation (2) defines the adhesion work W_a, which characterizes the interaction of the phases (W_a is referred to as a unit surface area). The surface tension will be directed tangentially to the corresponding surface σ and will be at a certain angle to the contact plane, it is called the edge wetting angle. We denote the value of the edge wetting angle by the letter θ.

To determine the equilibrium work of adhesion of a liquid, we can use the Dupré-Young equation, which gives the calculation of the work of adhesion W_a based on the experimentally determined boundary wetting angle θ [28]:

$$W_a = \sigma(1+\cos\theta). \qquad (3)$$

When the blade operates in the air flow, the interaction between the solid surface and air will occur. To be able to visually observe the action of electrostatic forces, let us consider the interaction between the solid surface and liquid. To do this, consider the phenomenon of wetting, which occurs when a solid comes into contact with a liquid as a result of molecular interaction between them. It is well known that the wetting phenomenon consists in the fact that a drop of liquid that has fallen on the surface of a solid spreads. The mechanism of liquid spreading on the surface of a solid differs from the mechanism of liquid spreading on the surface of liquids, which is characterized by molecular mobility. Liquids spread over solid surfaces due to diffusion, capillarity, liquid volatility, and other reasons. If the molecules of a liquid interact with the molecules of a solid more strongly than with each other, the liquid spreads over the surface, i.e., wets it. The spreading continues until the liquid covers the entire surface or until the liquid layer becomes monomolecular. This phenomenon is called complete wetting.

There will be no spreading if the molecules of the liquid interact with each other much more strongly than with the molecules of the solid. The liquid will collect in drops. That is, when the repulsive forces between solid molecules are greater than the attractive forces between water molecules, there will be no spreading of water on the surface and the water will collect in drops. Between these cases, there are transitional cases of incomplete wetting when the droplet forms a certain equilibrium angle with the surface of the solid, called the edge angle, or wetting angle θ. The edge angle θ is the angle formed by a liquid droplet between the tangent to its surface and the surface of a solid. The smaller this angle, the better the liquid wets the surface of the solid. The larger this angle θ, the less the liquid wets the surface of the solid, and thus electrostatic forces (forces of interaction between two charged particles) create forces of repulsion of individual dipoles between the solid surface and the liquid. Consider the cross section of a water drop in the Fig. 2.

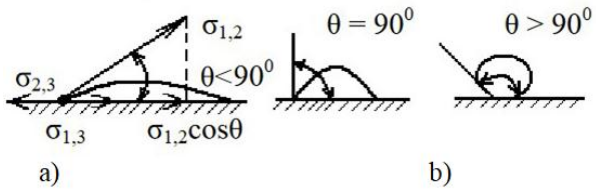


Fig. 2- Cross-section of a liquid droplet on a solid surface: a) in the cases of wetting of a solid surface; b) non-wetting of a solid surface

Thus, there are three forces per unit length of the wetting perimeter $\sigma_{1,2}$; $\sigma_{2,3}$ i $\sigma_{1,3}$. Then the condition of equilibrium of forces, expressed by the Young's equation, will be [29]:

$$\sigma_{2,3} = \sigma_{1,3} + \sigma_{1,2}\cos\theta \qquad (4)$$

From here.

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{2,3} - \sigma_{1,3}}{\sigma_{1,2}} \qquad (5)$$

The value of $\cos\theta$, characterizing the ability of a liquid to wet a surface, is called wetting and is denoted by B. It is obvious that when the $\theta = 0^\circ$, $B = +1$, with complete non-wetting $\theta = 180^\circ$, $B = -1$. Of the two liquids, the one that wets a given surface better and whose spreading decreases the surface energy

of the system by a large amount. Thus, the wetting of a solid surface by a liquid can occur only when the surface tension between the solid surface and the liquid ($\sigma_{1,2}$) will be less than the surface tension between the solid and the gas ($\sigma_{1,3}$). Otherwise, the liquid will not wet the surface of the solid. The closer the polarity of the adhesive and the substrate, the stronger the contact between them.

Electrical theory attributes adhesion to the formation of a double electric layer

between the adhesive and the substrate. The theoretical assessment of adhesion is currently very approximate, which is explained not only by the imperfection of the equations that calculate the forces of intermolecular bonds, but also by the fact that it is impossible to estimate the actual number of bonds per unit area (it is always less than the theoretical one, which indicates the possibility of increasing the strength of the bond). In addition, it is difficult to estimate the true contact area, which, due to the roughness of the surface layer, is sometimes much larger than what is observed visually. To ensure the strength of the joints, the roughness is often deliberately increased by special surface treatment of the materials.

Adhesion performance can be determined by indirect methods, which are especially convenient if at least one of the interacting phases is a liquid, making it possible to measure, for example, the edge wetting angle θ. The wettability of some solids with water is characterized by the following edge angles: quartz - 0°, malachite - 17°, graphite - 55°, talc - 69°, paraffin - 106°, teflon - 108°. According to the literature [25-27], teflon and paraffin have the largest edge angles and have better water-repellent properties. Experimental studies were conducted to confirm the theoretical provisions of the possibility of reducing the attraction of liquid or gas by solid molecules with their surface, and hence reducing the drag of a propeller.

To conduct experimental studies of the effect of the electrostatic water-repellent coating of the propeller blades, a monobloc propeller with a diameter of 125 cm and a pitch of 57 cm was manufactured. The material from which the propeller was made was pine bars. The dimensions of the bar for making the propeller are 12 cm x 5 cm. We glued the bars together from several boards. For a workpiece thickness of 5 cm, we took 2 boards 12 cm wide, where one is 2 cm thick and the other is 3 cm thick.

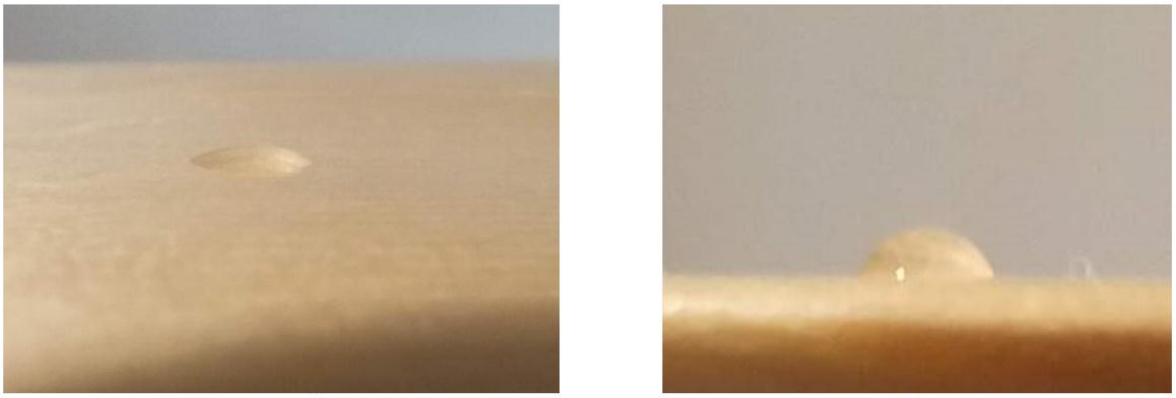
Certain areas of the screw, such as the blade tips, the leading edge near the tip, the hub surface, the bolt holes, and the center hole, require greater strength and hardness. For example, when tightening the bolts to secure the screw, the hub surface of the screw may be jammed by excessive stress, and the leading edge of the blade may be damaged if grass or other materials are caught in the screw. To provide strength and hardness to certain areas of the blade surface, we treated them with a universal waterproof adhesive. The glue is applied to the ground surface of the screw in the areas that need to be strengthened and hardened. The adhesive is quite liquid, so it penetrates deeply into the wood. Depending on the type of wood, the adhesive penetrates to a depth of $0.5 \div 1$ mm, which makes the surface quite hard and durable.

A two-component polyurethane varnish is used for the outer surface coating of the propeller. The varnish is mixed with a hardener in a ratio of 4 to 1. It is important to add the optimal amount of hardener, as a violation of the proportion will increase the drying time of the varnish. The consumption of the varnish per blade of a 125 cm diameter screw per coating was 20 g. The application of layers of varnish on the surface of the propeller was carried out 2 times.

To assess the impact on the economic and traction performance of the designed propeller with a varnish coating and an electrostatic water-repellent coating, experimental studies of operation in real conditions were conducted on a paramotor unit with a Solo 210 engine with a power of 14 hp. According to the passport data, the maximum speed of this engine is 6200 rpm. The gear ratio is 2.5. Sky-Country Moscito-4 wing. The wing area is 27.5 m^2. The appearance of the paramotor unit is shown in the Fig. 3.

Initial experimental studies were conducted with a propeller with only a varnish coating. The economic and traction performance of the paramotor unit was measured and recorded during a 5-hour flight. The results of experimental studies of the propeller with a varnish coating on its surface are presented in Table 1. After the initial tests, the propeller was removed from the paramotor unit and a drop of water was applied to its surface to assess the surface tension on the propeller's varnish coating. A photo of the water droplet on the propeller surface before and after the varnish coating was applied is shown in Figure 4, a. After the next electrostatic water-repellent coating is applied and cured, a water droplet is also applied to its surface. A photo of a water droplet on the surface of a propeller with an electrostatic water-repellent coating is shown in Fig. 4, b.

Fig. 3- Exterior view of a paramotor unit with a propeller 125×57 cm



a) b)

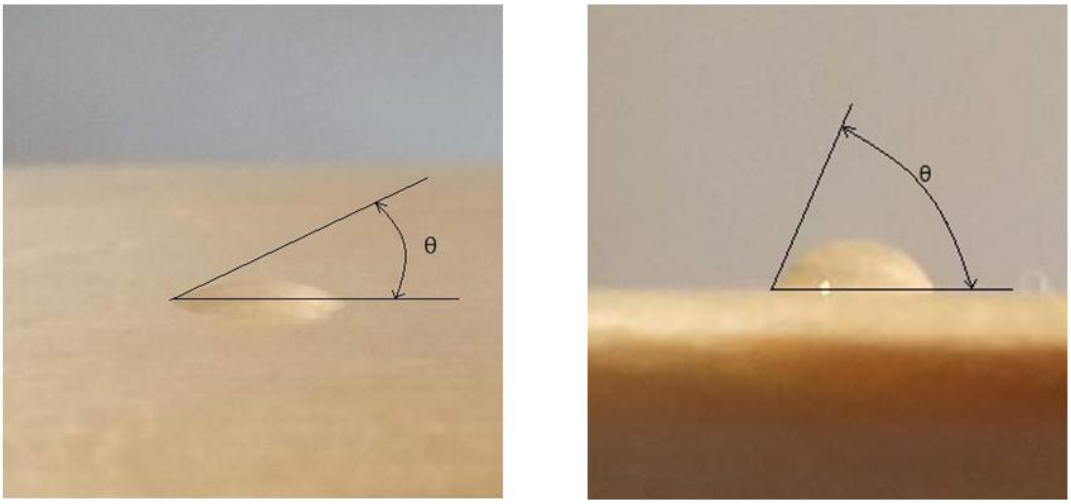
Fig. 4- A drop of water applied to the blade surface: a) with a varnish coating; b) with an electrostatic water-repellent coating

To visualize the wetting edge angle θ, we draw tangent lines to the surfaces of the water droplet for two variants of the propeller surface - a varnished surface and a propeller surface with an electrostatic water-repellent coating. The tangent lines drawn to the surfaces of the water droplet to represent the edge wetting angle θ are shown in Fig. 5.

As can be seen from Fig. 5, on the surface of a lacquered propeller, the edge wetting angle of the surface θ is about 300, and on the surface of the propeller, which is treated with an electrostatic water-repellent liquid, the edge wetting angle of the surface θ is about 700.

To evaluate the effect of the propeller surface properties, namely, the reduction of its frontal resistance to air flow, repeated experimental studies were conducted with a propeller on the surface of which an electrostatic water-repellent coating was applied. During a 5-hour flight, the economic and traction performance of the paramotor unit was measured and recorded. The results of experimental studies of the propeller operation with two different types of surface coatings are listed in the Table 1.

The treatment of the propeller surface with an electrostatic water-repellent coating according to the proposed method showed an increase in the maximum engine speed during the operation of the propeller installation on site and in flight. According to the studies, the use of an electrostatic water-repellent coating can reduce fuel consumption by 4...6%.



a) b)

Fig. 5 - Image of the edge wetting angle θ of the propeller surface for:
a) varnish coating of the propeller surface; b) electrostatic water-repellent coating of the propeller surface

Table 1.
Results of experimental studies of the operation of a propeller with two different coatings of its surface

Indicators	Screw 125 x 57 cm The surface of the propeller is varnished	Screw 125 x 57 cm Propeller surface with electrostatic water-repellent coating
Edge wetting angle of the propeller surface, θ, °	30	70
Increase in the edge wetting angle of the propeller surface, θ, °	0	40
Maximum engine speed in place, rpm	6030 ÷ 6050	6130 ÷ 6150
Increase in maximum engine speed on site, %.	0	1.67
Maximum engine speed in flight at a speed of 43 ÷ 45 km/h (climb), rpm	5970 ÷ 6000	6010 ÷ 6030
Engine speed in cruise mode (horizontal flight), rpm	5200…5400	5200 ÷ 5400
Thrust in place, kg	42 ÷ 44	43 ÷ 45
Increase in propeller thrust, %.	0	3.7 ÷ 4
Flight altitude, m	100 ÷ 200	100 ÷ 200
Pilot weight, kg	92	92
Weight of the paramotor unit (dry), kg	23	23
Air temperature, ℃	25	25
Fuel consumption for 1 hour of the route flight, *l*	3 ÷ 3,15	2,8 ÷ 2,9
Fuel economy, %.	0	4 ÷ 6

Conclusions

The use of an electrostatic water-repellent coating on the blades of an air rotor makes it possible to improve its aerodynamic properties and increase the efficiency of the propeller group. A methodology for evaluating the electrostatic repellent properties of a

material by using water-repellent phenomena at its edge wetting angle is proposed. According to the described method of using the electrostatic water-repellent coating of propeller blades, the studies were carried out on a paramotor installation with a 14 hp Solo 210 engine and a Moscito-4 wing in flight mode and during operation on site. The results of experimental studies have shown that when applying an electrostatic water-repellent coating to the blades of an air rotor, it is possible to obtain a higher thrust by 4%, reduce its drag and improve the fuel and economic performance of the propeller installation, namely, reduce fuel consumption by 4 ÷ 6%.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Adebimpe, S 2023, Propeller Aerodynamic Design and Optimization, https://doi.org/10.20944/preprints202310.0418.v1. (Last accessed: 19 October 2024)
2. Rizzi, A & Oppelstrup, J 2021, "Introduction to Aircraft Aerodynamic Design," in *Cambridge University Press eBooks*, pp. 1–44, https://doi.org/10.1017/9781139094672.003.
3. Lukianov, P & Dusheba, O 2023, "Modeling of aerodynamic noise of quadrotor type aerotaxi," *Aerospace Technic and Technology*, (4):38–49, https://doi.org/10.32620/aktt.2023.4.05.
4. Cummings, RM & Bertin, JJ 2021, Aerodynamics for engineers. *Cambridge University Press*. https://doi.org/10.1017/9781009105842.
5. Zhornik, O, Kravchenko, I, Mitrakhovych, M & Balalaieva, K 2022, "Comparative evaluation of the efficiency of the ring-type and bucket inlet devicesfor a power plant with a turbopropfan engine," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (118)):6–12, https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263023.
6. Hoyos, JD, Alvarado, JP & Jiménez, JH 2021, "Propeller aerodynamic optimisation to minimise energy consumption for electric fixed-wing aircraft," *The Aeronautical Journal*, 125(1292):1844–1870, https://doi.org/10.1017/aer.2021.51
7. Hoyos, J, Jímenez, JH, Echavarría, C & Alvarado, JP 2021, "Airfoil Shape Optimization: Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms, Airfoil Parameterization Methods and Reynolds Number Impact," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 1154(1):012016, https://doi.org/10.1088/1757-899x/1154/1/012016.
8. Mian, HH, Wang, G, Zhou, H & Wu, X 2021, "Optimization of thin electric propeller using physics-based surrogate model with space mapping," *Aerospace Science and Technology*, 111106563, https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.106563.
9. Smith, J & Anderson, P 2020, "Nanocoatings in aviation: Enhancing propeller efficiency and durability," in *Journal of Aviation Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 45–59.
10. Chen, L & Wu, X 2021, "Nanotechnology in aircraft propeller design: Future trends," in *Aerospace Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 78–89.
11. Hussain, M, Abdel-Nasser, Y, Banawan, A & Ahmed, Y M 2020, "FSI-based structural optimization of thin bladed composite propellers," in *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 5, pp. 3755–3766, https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.032.
12. Bhat, A, Budholiya, S, Aravind Raj, S, Sultan, M T H, Hui, D, Md Shah, A U & Safri, S N A 2021, "Review on nanocomposites based on aerospace applications," in *Nanotechnology Reviews*, vol. 10, no. 1, pp. 237–253, https://doi.org/10.1515/ntrev-2021-0018.
13. Rashid, A B, Haque, M, Islam, S M M & Uddin Labib, K M R 2024, "Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications," in *Heliyon*, vol. 10, no. 2, e24692, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692.
14. Zhu, H & Li, J 2024, "Advancements in corrosion protection for aerospace aluminum alloys through surface treatment," in *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 19, no. 2, 100487, https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100487.
15. Adkins, C N & Liebeck, R H 1994, "Design of optimum propellers," in *Journal of Propulsion and Power*, vol. 10, no. 5, pp. 676–682, https://doi.org/10.2514/3.23779.
16. Jiménez, J H, Hoyos, J D, Echavarría, C & Alvarado, J P 2022, "Exhaustive analysis on aircraft propeller performance through a BEMT tool," in *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, vol. 54, pp. 13–23, https://doi.org/10.6125/JoAAA.202203_54(1).02.

17. Trishch, R, Cherniak, O, Zdenek, D & Petraskevicius, V 2024, "Assessment of the occupational health and safety management system by qualimetric methods," in *Engineering Management in Production and Services*, vol. 16, no. 2, pp. 118–127, https://doi.org/10.2478/emj-2024-0017.
18. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, "Assessment of safety risks using qualimetric methods," in *MM Science Journal*, 2023(3), https://doi.org/10.17973/mmsj.2023_10_2023021.
19. Cherniak, O, Trishch, R, Ginevičius, R, Nechuiviter, O & Burdeina, V 2024, "Methodology for Assessing the Processes of the Occupational Safety Management System Using Functional Dependencies," in *Lecture notes in networks and systems*, pp. 3–13, https://doi.org/10.1007/978-3-031-60549-9_1.
20. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Kupriianova, K 2022, "A General Approach for Tolerance Control in Quality Assessment for Technology Quality Analysis," in *Lecture notes in mechanical engineering*, pp. 330–339, https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_31.
21. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Bondarenko, T 2021, "Mathematic Model of the General Approach to Tolerance Control in Quality Assessment," in *Lecture notes in mechanical engineering*, pp. 415–423, https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_41.
22. Labs of Latvia 2021, *Nanocoatings for the New Generation of Aviation Engine Parts Developed by* RTU, https://labsoflatvia.com/en/news/nanocoatings-for-the-new-generation-of-aviation-engine-parts-developed-by-rtu (Last accessed: 19 October 2024)
23. Gu, Y, Xia, K, Wu, D, Mou, J & Zheng, S 2020, "Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review," *Coatings*, 10(3):233, https://doi.org/10.3390/coatings10030233.
24. Kiesel, L 2021, "Advanced air plasma spray TBCs for aerospace and industrial components," in *Honeywell Aerospace Technologies*, https://aerospace.honeywell.com/us/en/learn/about-us/blogs/advanced-air-plasma-spray-tbcs. (Last accessed: 19 October 2024)
25. Kobayakawa, M & Onuma, H 1985, "Propeller aerodynamic performance by vortex-lattice method," in *Journal of Aircraft*, vol. 22, no. 8, pp. 649–654, https://doi.org/10.2514/3.45181.
26. Lopez, N R 2020, "Resistant project: How can nanotechnology reduce environmental impacts of aircrafts?" in *Open Access Government*, https://www.openaccessgovernment.org/nanotechnology-reduce-environmental-impacts-of-aircrafts/85311. (Last accessed: 19 October 2024)
27. Israelachvili, J N 2015, *Intermolecular and Surface Forces*, Elsevier Science & Technology Books.
28. Hunter, R J 2001, *Foundations of Colloid Science*, 2nd edn, Clarendon Press, Oxford, 806 pp., ISBN 0-19-850502-7.
29. Kruk, T, Szczepanowicz, K, Kręgiel, D, Szyk-Warszyńska, L & Warszyński, P 2016, "Nanostructured multilayer polyelectrolyte films with silver nanoparticles as antibacterial coatings," in *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 137, pp. 158–166, https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.06.016.

The article was received by the editors 10/20/2024
The article is recommended for printing 11/22/2024

[1]**СОЛОВЕЙ І. М.,** кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехнологій та експлуатації енергетичного устаткування
e-mail: iwan70@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4715-3795
[2]**КУЗНЄЦОВ В. Д.,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: v.kuznietsov@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1145-9281
[2]**ЧЕРНЯК К. М.,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: k.m.cherniak@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9225-9498
[2]**МАЛАХОВ І. В.,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: i.m.malakhov@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0005-5540-4840
[2]**РОМАШКІН Д. Д.,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: d.d.romashkin@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0009-1410-4306
[2]**КОМПАНЕЦЬ В. В.,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: v.v.kompanets@khai.edu ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6016-0244

[1]*Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»*
Бережани, 47501, Укріїна
[2]*Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"*
17 вул. Вадима Манька, Харків, 61070, Укріїна

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ВОДОВІДШТОВХУВАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ЛОПАТЕЙ ПОВІТРЯНОГО ГВИНТА НА ЙОГО АЕРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

У статті представлено підходи до розроблення методики підвищення основних аеродинамічних характеристик повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку. Метою роботи являється удосконалення основних аеродинамічних характеристик повітряних гвинтів фіксованого та змінного кроку шляхом нанесення електростатичного водовідштовхувального покриття на поверхню лопатей. У статті вирішуються наступні завдання: аналіз основних способів підвищення аеродинамічних характеристик повітряного гвинта при використанні покриття його поверхні, яке забезпечує покращення його аеродинаміки, обґрунтування методу зменшення лобового опору повітряного гвинта, дослідження запропонованого методу зменшення лобового опору повітряного гвинта при нанесенні електростатичного водовідштовхувального покриття на його лопаті. Використовуються такі методи: порівняльний аналіз, експериментальне дослідження.

Отримані результати дозволяють зменшити лобовий опір повітряного гвинта та підвищити його аеродинамічні характеристики, що дозволяє підвищити ефективність роботи гвинтомоторної групи та підвищити її паливно-економічні показники. Використання електростатичного водовідштовхувального покриття лопатей повітряного гвинта дозволяє підвищити його аеродинамічні характеристики та підвищити ефективність роботи гвинтомоторної групи. Результати експериментальних досліджень показали, що при нанесенні такого покриття на лопаті повітряного гвинта можна отримати більшу тягу за рахунок зниження його лобового опору та покращити паливно-економічні показники гвинтомоторної установки, а саме знизити розхід палива.

КЛЮЧОВІ СЛОВА*: якість поверхні, оцінка якості поверхні гвинта, гвинт, лопать гвинта, покриття гвинта, аеродинамічні характеристики гвинта.*

Як цитувати: Solovei I., Kuznietsov V., Cherniak K., Malakhov I., Romashkin D., Kompanets V**.** (2024). Influence of electrostatic water-repellent coating of the propeller blades on its aerodynamic characteristics. *Машнобудування*. 2024. Вип. 34 С. 6-16. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-01

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Стаття надійшла для редакції 20.10.2024 Стаття рекомендована до друку 22.11.2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02
УДК 658.62.018.012

[1]**Г. С. ГРІНЧЕНКО,** кандидат техн. наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: h.s.hrinchenko@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1]**О. В. КІПОРЕНКО,**
студент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kiporenko.oleksii22@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1683-2640
[1]**С. С. НЕГОДОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: titansv2017@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3561-6924
[1]**А. Я. ЛИСЕНКО,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: dagost@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3916-8029
[1]**К. К. МАЗОРЧУК,**
аспірантка кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:ekaterina.mazorchuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3916-8029
[1]**Р. С. НОС,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: nosruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0769-4872
[1]*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

РОЗВИТОК НОРМАТИВНОГО ПІДХОДУ ДО ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ЕНЕРГОПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Аналіз нормативного підходу оцінювання ризиків функціонування енергетичних систем для їх подальшого удосконалення та розвитку.

У статті розглянуто підходи до оцінки ризиків у функціонуванні міських енергетичних систем з метою розробки ефективної стратегії управління на основі нормативного підходу. В статті проаналізовано підходи оцінювання ризиків та виділено нормативний підхід, як основа для управління ризиками, що потребує впровадження кваліметричної оцінки впливу зовнішніх та внутрішніх факторів, які передбачені нормативними документами. Проаналізовано та визначено основні проблеми управління та оцінювання оцінки ризиків, зокрема необхідність комплексного підходу до оцінки ризиків та важливість оцінки не тільки функціонування окремих компонентів системи, але й взаємозв'язків між ними та процесами, що протікають в межах системи і мають вплив, як на технічну систему, так і на навколишнє середовище. Запропоновано розглядати наслідки порушення нормальних умов експлуатації енергообладнання, як ризик для кваліметричного оцінювання технічних систем через можливості відновлення, модернізації обладнання. В якості моделі управління ризиками функціонування технічних систем пропонується модель, що базується на інтенсивності відмов та ймовірності відновлення працездатності енергетичної системи. Запропоновано шкалу для оцінювання настання небажаної події за рівнем безпеки та наслідків цих подій шляхом врахування відновлення як технічного компоненту ситстеми (з урахуванням часу відновлення), так і екологічних наслідків і можливостей їх усунення, враховуючи час та рівень збитків. Для оцінювання і управління проаналізовано вплив зовнішніх факторів на функціонування технічної системи та запропоновано оцінку використовуючи матриці ризику. Такий підхід дозволяє оцінити ефективність впровадження, організації та функціонування системи, а головне - управляти та покращувати функціонування системи на будь-якому етапі її життєвого циклу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *ризик, нормативний підхід, енергетичні підприємства, управління, оцінювання, матриці ризику.*

Як цитувати: Грінченко Г. С., Кіпоренко О. В., Негодов С. С., Лисенко А. Я., Мазорчук К. К., Нос Р. С. Розвиток нормативного підходу до оцінювання ризиків енергопідприємств. *Машнобудування*. 2024. Вип. 34 С. 17-30. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02

© Грінченко Г. С., Кіпоренко О. В., Негодов С. С., Лисенко А. Я., Мазорчук К. К., Нос Р. С., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

Очікуване в найближчі десятиліття зростання внутрішнього енергоспоживання та обсягу експорту електроенергії, обмеженість запасів органічного палива для теплових станцій, екологічні виклики, пов'язані з тепловою енергетикою, а також відсутність в Україні значних невикористаних гідроенергетичних ресурсів і песимістичні прогнози щодо комерційного впровадження нетрадиційних джерел енергії визначають ядерну енергетику як безальтернативний напрям, який вирізняється високою конкурентоспроможністю. Водночас розвиток атомної енергетики супроводжується численними упередженнями та суперечностями, пов'язаними з її використанням, зокрема через потенційні загрози соціальної безпеки, ризики забруднення навколишнього середовища та технологічні проблеми безпеки, які можуть призводити до суттєвих економічних втрат. Усі ці аспекти вимагають глибокого аналізу та застосування науково обґрунтованих методів оцінки ризиків і можливих загроз.

Комплексний аналіз ризиків енергетичного об'єкта дозволяє прогнозувати потенційні загрози для роботи атомних станцій на різних етапах: під час планування роботи енергоблоку, упродовж проєктного терміну експлуатації, а також при продовженні термінів експлуатації з урахуванням змін, що виникли під час роботи обладнання. Оцінка здатності енергетичного об'єкта, як складної системи, адаптуватися до можливих загроз є важливою складовою аналізу ризиків. Це забезпечує більш точну й економічно обґрунтовану оцінку функціонування системи та сприяє розробці ефективної стратегії управління ризиками для підвищення безпеки урбанізованих енергетичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Управління та оцінювання ризиків умовно поділяють на кілька підходів, які застосовуються в соціальних та інженерних системах. Серед них: кількісний аналіз, що базується на статистичних даних і прогнозуванні ймовірності загроз; якісний аналіз, орієнтований на використання якісних характеристик; сценарний підхід, який передбачає моделювання можливого розвитку подій; оцінювання ризиків відповідно до нормативних документів, таких як ISO 31000 або ISO 9001; а також використання інформаційних технологій [1]. На практиці кожен із цих методів має свої переваги та недоліки, тому їх зазвичай застосовують у поєднанні для досягнення більш точних і комплексних результатів.

Серед найпоширеніших кількісних методів аналізу ризиків інженерних систем виділяється метод Монте-Карло [2-6], який дозволяє моделювати ймовірності відмов у різних системах та вибирати оптимальні параметри. Ще одним широко використовуваним методом є аналіз дерева відмов (Fault Tree Analysis) [7-12]. У роботі [7] запропоновано застосування цього підходу для виявлення джерел небезпеки в підсистемах міського транспортного комплексу через аналіз типових ризикових подій, які були трансформовані в баєсівські мережі для подальшого кількісного аналізу.

Дослідження [10, 11] пропонують оцінювати ризики динамічних характеристик систем за допомогою автоматичної генерації та кількісного аналізу динамічних дерев відмов, враховуючи часові характеристики та надмірність. Автоматична побудова дерев відмов та їх аналіз сприяють ефективній ідентифікації критично важливих елементів, а також дають можливість порівнювати альтернативні концепції побудови системи [11, 12].

Метод аналізу дерева відмов дозволяє оцінювати комплексний ризик із детальною індикацією окремих його складових, що може слугувати основою для подальшої оцінки стійкості, надійності об'єктів та їхнього перспективного розвитку, забезпечуючи необхідний рівень безпеки.

Якісний аналіз ризиків часто поєднується з кількісним для оцінки інженерних систем. Прикладами методів якісного аналізу є SWOT-аналіз, матриця ймо-

вірності та впливу ризиків, а також експертні опитування [13-19]. SWOT-аналіз і експертне оцінювання здебільшого застосовуються для оцінки ризиків у соціально-економічних системах [14-16], тоді як у технічних системах ризики пов'язують з безпекою. Для оцінки таких ризиків використовують кваліметричні методи, зокрема матричний підхід для прийняття рішень або класифікації об'єктів за рівнем ризику [13, 17-19].

Оцінка ризиків відповідно до нормативних стандартів, таких як ISO 31000 [20], IEC 31010 [21], ISO 9001 [22], ISO 45001 [23], є важливим напрямком як у практичному, так і в науковому контекстах, зокрема при впровадженні систем управління якістю, забезпеченні безпеки та здоров'я працівників, а також для підвищення ефективності управління. Оцінка ризиків згідно з нормативними документами є гнучким процесом, що полягає у визначенні відповідності вимогам стандартів. Стандарти ISO є основою для оцінки та управління ризиками, а наукові дослідження в цій сфері зосереджені на розробці обґрунтованих методів оцінки ризиків, ідентифікації критеріїв небезпеки та ризиків, аналізі критичних подій і загроз, а також на шляхи системної інтеграції на підприємствах і стратегіях оцінки їх ефективності [24-27].

Кожна з наведених груп методів має свої переваги та недоліки (Рис. 1), і зазвичай застосовується в поєднанні для підвищення точності результатів та забезпечення ефективного управління ризиками. Для вибору оптимального підходу, що сприятиме стійкому управлінню підприємством, необхідно враховувати особливості об'єкта ризик-менеджменту.

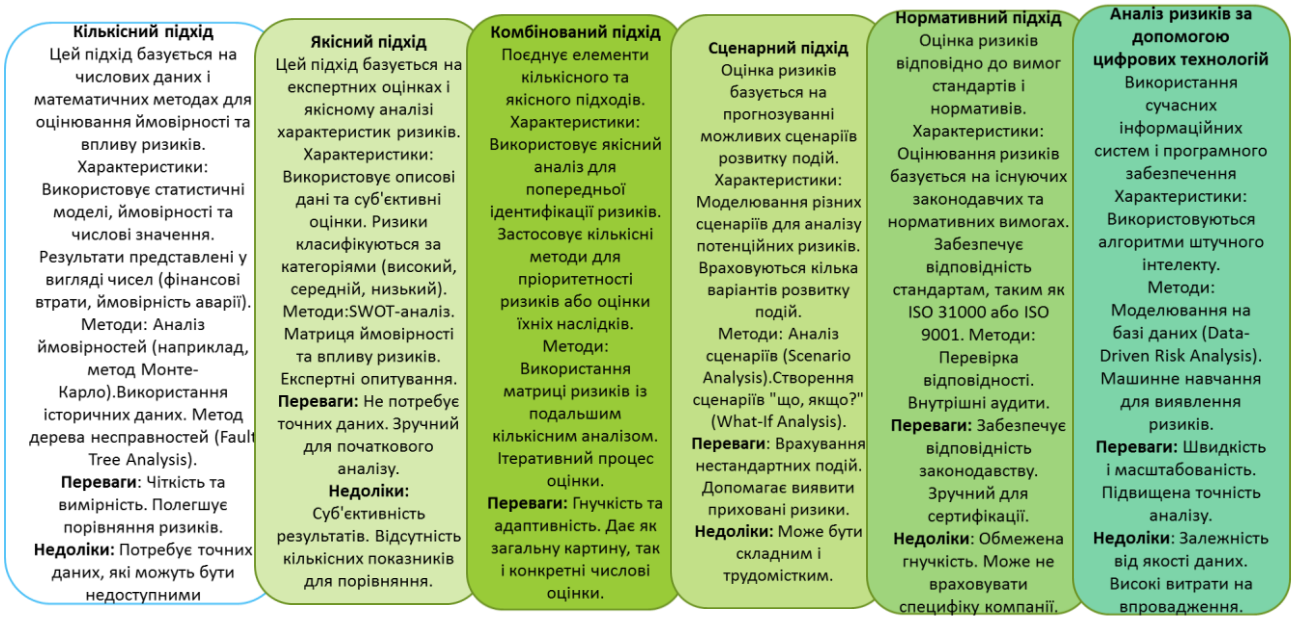


Рис. 1- Підходи до оцінювання ризиків
Fig. 1- Risk assessment approaches

Виклад основного матеріалу

Оцінка наслідків реалізації загроз та їх впливу на безперервність забезпечення потреб споживачів (населення, бізнесу, держави та суспільства) у паливно-енергетичних ресурсах є важливим елементом системи енергетичної безпеки. Крім того, важливим є оцінювання можливостей суб'єктів забезпечення енергетичної безпеки для запобігання розвитку негативних сценаріїв. Управління ризиками є визнаним у світі комплексним підходом, що передбачає розробку відповідних заходів і їх інтеграцію в документи державного планування. Метою є запобігання виникненню нових ризиків і зменшення наявних шляхом упровадження комплексних заходів на об'єктовому, галузевому та загальнодержавному рівнях.

Досвід багатьох країн підтверджує, що створення системи управління ризиками

має численні переваги, і ризикоорієнтовані підходи широко застосовуються в провідних країнах світу. Наприклад, у ЄС у 2015 році було затверджено методи оцінки ризиків для захисту критичної інфраструктури [28], які ґрунтуються на аналізі загроз і ризиків.

Ризик є невіддільною частиною будь-якої соціально-економічної діяльності, тому його наявність на підприємстві або в будь-якому процесі не є ані недоліком, ані перевагою. Сучасні підходи до управління ризиками ґрунтуються на концепції "прийнятного ризику", згідно з якою головною метою є досягнення максимальної надійності всіх видів діяльності шляхом утримання сукупного ризику в межах, визначених стратегією розвитку соціально-економічної системи [1].

Узагальнений підхід до оцінки ризиків включає: ідентифікацію загроз, оцінку частоти (ймовірності) реалізації кожної загрози; оцінку вразливості до кожної загрози, що разом з її частотою визначає ймовірність завдання шкоди; оцінку наслідків (шкоди) для найгіршого сценарію розвитку подій. Концепція ризик-менеджменту полягає не тільки в ідентифікації та оцінці загроз і наслідків, а охоплює більш широке коло процесів, поєднуючи розвиток та удосконалення підприємства з урахуванням можливих наслідків [20-23]. Для побудови моделі ризик-менеджменту енергетичного підприємства, яке є частиною складної соціоекологічної системи, можна визначити наступні етапи ідентифікації та управління ризиками згідно з нормативним підходом та міжнародних стандартів (рис. 2).

Управління ризиками може бути впроваджено на будь-якому етапі функціонування системи, при цьому важливо залучити всі рівні енергетичного підприємства до цього процесу, починаючи з вищого керівництва, яке визначає стратегію та встановлює максимальний рівень сукупного ризику (верхню межу). Впровадження управління ризиками в систему функціонування енергетичного підприємства полягає, зокрема, в тому, що до цього процесу залучаються практично всі його підрозділи.

Перший етап пов'язаний з формулюванням стратегії енергетичного підприємства, яка повинна базуватися на Політиці якості системи управління процесами. Політика якості визначає чіткі цілі, зміст, процедури та відповідальність за її виконання. Вона повинна мати офіційний статус, а весь персонал — усвідомлювати важливість кожної діяльності для загального розвитку, сталого функціонування підприємства та підвищення якості, а також усвідомлювати свою роль як професіонала в цьому процесі.

Інформаційно-аналітичний етап передбачає постійний моніторинг факторів, що можуть впливати на виникнення ризиків, як зовнішніх, так і внутрішніх. На цьому етапі проводиться збір, обробка, передавання та аналіз різної інформації, що дозволяє оцінити коло ризиків, які можуть виникнути в енергетичному підприємстві. До внутрішніх факторів можна віднести: технічний стан енергетичного обладнання, його модернізацію, зміни в режимах роботи, функціонування систем контролю та запобігання загроз, забезпечення безпеки технічних процесів, соціальні фактори (мотивація персоналу, його навчання, організація робіт та безпеки, дотримання правил і норм безпеки), нормативно-методичне забезпечення правил з безпеки праці, методичне та навчальне забезпечення процесів тощо. Зовнішні фактори включають: екологічні загрози (сейсмічна активність, пожежі, повені тощо), зміни в орієнтації замовників, кібератаки, військові конфлікти, форс-мажорні ситуації, що порушують нормальні умови функціонування систем, зміни в нормативно-правовому забезпеченні енергетичної діяльності тощо.

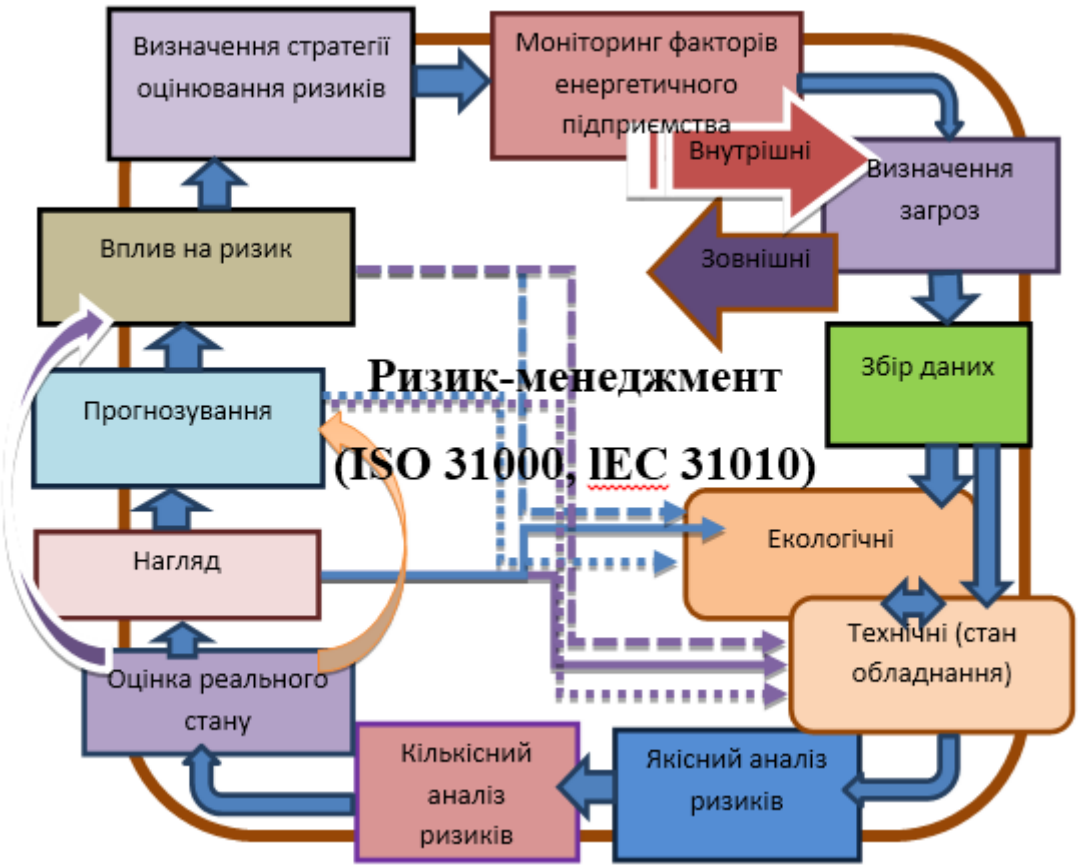


Рис. 1- Модель управління ризиками для енергетичного підприємства згідно з ISO 31000, IEC 31010

Fig. 1- Risk management model for an energy enterprise according to ISO 31000, IEC 31010

На наступному етапі доцільно визначити контекст ризику, що включає ідентифікацію ризиків енергетичного підприємства. Визначення ризиків ґрунтується на виявленні подій, які можуть впливати (як позитивно, так і негативно) на досягнення цілей, сформульованих у стратегії енергетичного підприємства. У межах системи управління якістю основною метою є забезпечення якості та стабільності функціонування енергетичного підприємства. Таким чином, контекстом ризику можна вважати фактори, що пов'язані з забезпеченням безпеки, стабільності та надійності роботи енергетичного об'єкта, а саме порушення нормальних умов експлуатації, виникнення небезпечних ситуацій, перевищення нормативних показників, що впливають на внутрішню безпеку системи та навколишнє середовище (перевищення антропогенного навантаження на екосистеми).

Наступний етап полягає у зборі даних відповідно до визначеного контексту ризиків. Цей етап, зазвичай, забезпечується представниками відповідних функціональних підрозділів під час регулярної діяльності або планових робіт, враховуючи контекст ризиків. Для енергетичного підприємства пропонується збір як статистичних, так і динамічних даних, що впливають на обладнання та характеризують його надійність при різних режимах експлуатації. Для оцінки впливу на зовнішнє середовище пропонується збір даних про антропогенне навантаження на територію підприємства (радіаційний фон, тепловий баланс, викиди забруднювальних речовин тощо). Важливо також враховувати, як екологічні фактори (природні ризики та загрози) впливають на технічний стан енергообладнання та стабільність його роботи, а також як технічні проблеми (порушення нормальної експлуатації, відмови, зупинки, пошкодження обладнання та системи) можуть змінювати навантаження на екосистеми.

Далі необхідно провести якісний аналіз ризику, що включає виявлення факторів ризику та оцінку наслідків їх

реалізації для стабільного функціонування енергетичного підприємства (вплив на цілі). На цьому етапі важливо враховувати всі обставини та наслідки ризиків, а також використовувати всі доступні інструменти якісного аналізу ризиків та оцінки, враховуючи специфіку процесів на енергетичному підприємстві.

Для проведення кількісного аналізу ризиків та підвищення його точності пропонується враховувати не лише ймовірність настання небажаної події, а й наслідки від можливих загроз та втрат. Рекомендується розподілити всі загрози на три типи:

- **Загрози з невідворотними наслідками** для технічної та екологічної складових системи енергетичного підприємства. Це можуть бути події, що призводять до незворотних руйнувань екосистеми (наприклад, такі, що неможливо відновити протягом 30 років), або до пошкодження енергообладнання, яке не підлягає ремонту або заміні, що суттєво впливає на роботу всієї енергетичної системи.
- **Загрози, що порушують нормальні умови в екологічній та технічній системах, але з можливістю часткового відновлення**. Наприклад, перевищення нормативних показників забруднення, яке можна усунути без невідворотних наслідків, але яке має певний вплив на навколишнє середовище. Також до цього типу належать порушення нормальних умов експлуатації енергообладнання, для усунення яких потрібно змінити режими експлуатації, що може призвести до зниження енергоефективності або порушити сталість функціонування системи без можливості повного відновлення.
- **Загрози, що призводять до порушення нормальних умов функціонування енергетичного підприємства, але з можливістю повного відновлення системи після усунення загрози**. Наприклад, перевищення екологічних показників (наприклад, екологічного фону територій АЕС), що не мають значного впливу на екосистему або що швидко відновлюються до нормативних значень, або порушення роботи тепломеханічного обладнання, яке швидко можна замінити або відремонтувати завдяки наявності резервування та модернізації систем, що дозволяє повернути систему до номінальних показників функціонування.

Для ініціації робіт з управління ризиками на енергетичному підприємстві наказом Директора створюється робоча та експертна групи з управління ризиками. До складу цих груп входять провідні фахівці з високою кваліфікацією та досвідом у галузі побудови й управління системою менеджменту якості, здатні розробити систему управління ризиками та забезпечити безперервний контроль. Робоча група розробляє проєкт Плану управління ризиками для кожного виду продукції енергетичного підприємства.

При визначенні небезпек, пов'язаних з кожним типом загрози, встановлюються їх властивості, а також якісні та кількісні ознаки та функції, що можуть негативно вплинути на безпеку функціонування підприємства. Це дозволяє визначити й вказати граничні значення та характеристики для цих факторів небезпеки. На основі аналізу цих факторів складається перелік відомих і потенційних небезпек, що виникають у процесі функціонування підприємства, із класифікацією за призначенням.

Для кожної визначеної небезпеки проводиться оцінка наслідків її реалізації, а також визначення причин і механізмів виникнення небезпеки. Крім того, розробляються заходи для запобігання або зниження ризику. Зібрані дані фіксуються в протоколі «Аналіз, оцінка і контроль ризиків», який оформлюється для кожної небезпеки кожного типу. На основі всебічного аналізу цих даних проводиться оцінка ризику (розрахунок індексу ризику), що є комбінацією двох компонентів: ступеня тяжкості можливої шкоди (**T**) та ймовірності настання збитку (**P**), яка в свою чергу включає ймовірність відмови та ймовірність відновлення системи.

Для оцінки ймовірності настання збитку застосовується п’ятибальна шкала ймовірностей, яка визначається експертами перед проведенням оцінки ймовірності для кожної встановленої небезпеки. Ця шкала наводиться у вигляді таблиці в Плані управління ризиками для кожного виду загрози. Характеристики кожного рівня ймовірності мають чітко відображати ймовірність виникнення збитку на основі аналізу факторів небезпеки, причин,

механізмів та заходів щодо їх зниження. Ранжування рівнів ймовірності є умовним і може не повністю відображати фактичну ймовірність виникнення збитків. Однак, з накопиченням досвіду, аналізом статистичних даних та уточненням оцінки ймовірності, ця шкала має поступово уточнюватися.

Для оцінки ймовірності небажаної події використовують такі методи: аналіз накопичених значущих даних, прогнозування ймовірності за допомогою аналітичних методів і симуляційних технік, а також оцінку ймовірності експертами. У випадках, коли ймовірність виникнення збитків може бути розрахована кількісно на основі значущих даних, для порівняння розрахованих значень ймовірності з п'ятьма описовими рівнями ймовірності, що використовуються в методиці оцінки якості, визначаються діапазони значень ймовірності, відповідні кожному з цих рівнів. Цей процес здійснюється за участю експертів - фахівців з великим досвідом роботи у відповідних галузях енергетичних систем. Під час оцінки ймовірності спочатку проводиться статистична перевірка значущості вихідних даних і точний розрахунок ймовірностей (табл. 1).

Таблиця 1

Шкала ймовірності настання небажаної події (загроз) на енергетичному підприємстві

Table 1

Probability scale of an undesirable event (threat) at an energy enterprise

Оцінка	**Ймовірність**	**Діапазон ймовірності**	**Визначення**
P1	Малоймовірна	$< 1x10^{-9}$	Високий рівень забезпечення безпеки технічної складової, малоймовірні загрози
P2	Дуже низька	$1x10^{-9}$–$1x10^{-8}$	Достаній рівень забезпечення безпеки, низька ймовірність загроз
P3	Середня	$1x10^{-8}$–$1x10^{-7}$	Ймовірні поодинокі події (загрози), недостаній рівень забезпечення безпеки
P4	Висока	$1x10^{-7}$–$1x10^{-4}$	Небезпека висока, повторюваність загроз високо ймовірна
P5	Надзвичайно висока	$>/= 1x10^{-4}$	Високий рівень небезпеки та ймовірність настання подій (загроз)

Для оцінки ступеня тяжкості можливих наслідків (T) використовується система з п'яти рівнів, що ранжуються, які визначаються та характеризуються експертами до проведення оцінки ймовірних збитків. Ця система представлена у вигляді таблиці в Плані управління ризиками. Характеристики кожного рівня ступеня тяжкості повинні дозволяти чітко віднести ймовірний збиток до одного з п'яти рівнів, ґрунтуючись на описі цього збитку. Ступінь тяжкості ймовірного збитку визначається як оцінка найсерйознішого наслідку небезпеки (якщо їх кілька). Аналіз ступеня тяжкості та ймовірності збитку має бути проведений таким чином, щоб полегшити прийняття рішення щодо зниження ризику через зменшення ступеня тяжкості наслідків або зниження ймовірності їх настання (табл. 2). Застосовуючи п'ятибальну шкалу для оцінки ймовірності збитків та їх тяжкості, розраховується матриця оцінки ризику, яка представлена у таблиці 3. Ці зони відповідають діапазонам значень ризику, що відповідають вищезазначеним рівням, і матриця включається до Плану управління ризиками енергетичного підприємства

Таблиця 2

Якісні характеристики наслідків небажаних подій на енергетичному підприємстві

Table 2

Qualitative characteristics of the consequences of undesirable events at an energy enterprise

Оцінка	**Наслідки**	**Визначення**
Т1	Незначні	Вплив на екосистему мінімальний, не спричиняє значних наслідків для персоналу та населення, технічні пошкодження не становлять загрози безпеці працівників, існують попереджувальні заходи, а також резервування для процесів/обладнання.
Т2	Низькі	Малозначні пошкодження без ускладнень, незначний вплив на екосистему, системи відновлюються швидко, без загрози для безпеки персоналу та здоров'я, технічний стан енергообладнання швидко відновлюється, висока ймовірність ремонту чи заміни, спричинення мінімальної моральної або матеріальної шкоди.
Т3	Помірні	Вплив на екосистему помітний, але система може відновитися протягом певного часу або часткове відновлення наближається до початкового стану. Загрози, що виникають, були враховані під час проєктування або модернізації енергетичного підприємства. Є можливість повного відновлення системи до номінальних параметрів, технічне обладнання підлягає ремонту, можливе заміщення окремих компонентів за умови певних економічних витрат (враховуючи час простою, матеріальні витрати тощо).
Т4	Значні	Вплив на екосистему значний, проте можливе часткове відновлення. Існує загроза безпеці та здоров'ю персоналу енергетичного об'єкта. Повне відновлення систем, процесів чи обладнання після настання події неможливе. Енергетичне обладнання має низьку ймовірність ремонтопридатності, і подальша робота в номінальних режимах не здійснюється. Це спричиняє значні економічні втрати через пошкодження, тривалі простої, заміну та модернізацію обладнання. Усунення наслідків у короткий термін неможливе
Т5	Критичні	При виникненні загроз відновлення системи неможливе. Екосистемі буде завдано невідворотні зміни, існує високий рівень загрози для безпеки та здоров'я населення і персоналу. Технічне обладнання не підлягає відновленню або заміні. Це призведе до значних матеріальних втрат та інших серйозних наслідків.

Таблиця 3

Матриця оцінки ризику для енергетичного підприємства

Table 3

Risk assessment matrix for an energy enterprise

Ймовірність загроз / наслідків	**Т1**	**Т2**	**Т3**	**Т4**	**Т5**
Р1	РП	РПП	РПП	РН	РН
Р2	РПП	РПП	РН	РН	РН
Р3	РПП	РН	РН	РН	РН
Р4	РН	РН	РН	РН	РН
Р5	РН	РН	РН	РН	РН

Індекс ризику:

Ризик неприпустимий (РН)

Ризик практично прийнятний, але потребує постійного моніторингу та контролю (РПП)

Ризик прийнятний (РП)

Слід зазначити, що це не класичний варіант матриці, що розроблено з урахуванням підвищених вимог для енергетичного підприємства, як для об’єкта підвищеної небезпеки. На основі висновку щодо кожного ризику приймається одне з двох рішень:

Якщо оцінений ризик є досить малим (індекс ризику потрапляє в діапазон рівня прийнятних ризиків), то цей ризик можна проігнорувати, і не потрібно розробляти заходи для його зниження.

Якщо ризик є досить великим, необхідно визначити та вжити заходів для його контролю.

У разі прийняття рішення про необхідність зниження рівня ризику для певної небезпеки, слід вжити заходів для його контролю, щоб знизити його до прийнятного або до практично низького рівня. Заходи щодо попередження, зниження або утримання ризику в межах контрольованих значень розробляються фахівцями експертної та робочої груп. Процес розробки цих заходів починається з вивчення можливості зниження рівня ризику за умови реалізації всіх доступних засобів.

Якщо встановлено, що знизити індекс ризику до рівня прийнятних ризиків неможливо, розробляються заходи для зниження індексу ризику до рівня прийнятних на практиці низьких ризиків. Після виконання зазначених заходів проводиться оцінка залишкових ризиків з урахуванням вжитих заходів для запобігання або зниження ризику.

Після вжиття заходів щодо зниження ризиків можуть виникнути технологічні та технічні зміни, зміни в процесах функціонування підприємства, а також у заходах і системах контролю. Ці зміни можуть призвести до виникнення нових ознак і функцій, тобто нових чинників небезпеки й пов'язаних з ними ризиків. Так, наприклад, модернізація енергетичного обладнання може призвести до виявлення нових загроз, зниження рівня безпеки, застосування нових ресурсів, що впливають на економічність та енергоефективність тощо. Щоб переконатися, що в процесі впровадження заходів щодо запобігання або зниження ризиків не з'явилися нові фактори небезпеки, проводиться повторний аналіз ризиків.

Після проведення заходів щодо запобігання і зниження ризиків, визначених у процесі організації контролю ризиків, а також оцінки кожного залишкового ризику, робоча група з управління ризиками здійснює загальну оцінку залишкового ризику. Для визначення критеріїв прийнятності загального залишкового ризику експертами розробляється відповідна шкала для кожного фактора загрози. Максимальне значення шкали отримується шляхом підсумовування значень індексів ризику для всіх встановлених небезпек. Отриману шкалу експерти ділять на діапазони, що відповідають прийнятним ризикам, прийнятним на практиці ризикам та неприйнятним ризикам.

Оцінка досвіду та переоцінка ризиків проводиться у таких випадках:

- при систематичному перегляді та оновленні плану управління ризиками;
- у разі зміни національної або міжнародної нормативної бази у сфері ризиків та безпеки;
- при отриманні незадовільних результатів моніторингу процесу управління ризиками;
- у разі виникнення небезпечних ситуацій;
- при модернізації обладнання, зміні режимів експлуатації тощо;
- при перепризначенні термінів експлуатації енергетичного підприємства.

Однією з основних умов ефективності та результативності управління ризиками на підприємстві є належна організація та підтримка системи реалізації, контролю та оцінки цього процесу. Функція організації управління ризиками, забезпечення необхідними ресурсами, включаючи кваліфікований персонал, а також систематичний контроль та оцінка діяльності з управління ризиками, лежить у сфері відповідальності вищого керівництва енергетичного підприємства.

Висновки

Сучасний стан енергетичних підприємств потребує ефективних стратегій управління для забезпечення безпеки та сталості функціонування. Реалізація цих стратегій можлива на основі впровадження підходів до управління та оцінювання ризиків що ґрунтуються на нормативному підході, а саме застосування міжнародних стандартів з управління якістю ISO 9001 та ризик-менеджменту ISO 31000, IEC 31010. На основі цих стандартів запропоновано модель управління ризиками для енергетичного підприємства та розглянуто кожний етап її реалізації. На етапі оцінювання ризиків запропоновано згідно з нормативними документами якісний та кількісний аналіз ймовірності настання небажаних подій (загроз) та врахування наслідків. В основу аналізу пропонується враховувати вплив технічних змін енергообладнання та екологічний вплив (наприклад, несприятливі умови навколишнього середовища, сейсмоактивність тощо). При оцінюванні наслідків порушення умов функціонування теж пропонується враховувати як внутрішні впливи, а саме можливість відновлення обладнання, модернізації, зміни режимів експлуатації тощо, так і вплив на навколишнє середовище в результаті настання можливих небажаних подій. Для оцінювання ймовірності настання подій та наслідків застосовують шкалу, яка має 5 рівнів безпеки та відповідні кількісні характеристики ймовірності загроз, та п`ятибальну шкалу описових рівнів наслідків для навколишнього середовища та технічного обладнання енергопідприємства (від можливостей повністю відновлення до невідворотних змін). Визначення кожного рівня ризику пропонується в рамках систем управління ризиками (нормативного підходу) визначати й характеризувати експертами під час проведення періодичного та систематичного моніторингу та контролю параметрів енергетичних систем для оцінки ймовірностей загроз та наслідків, що виникають при функціонуванні енергетичного підприємства.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Trishch, R., Nechuiviter, O., Hrinchenko, H., Bubela, T., Riabchykov, M., Pandova, I. Assessment of safety risks using qualimetric methods. *MM Science Journal.* Oct. **2023**, 6668. doi: 10.17973/MMSJ.2023_10_2023021
2. Qian Zhang, Yaoqi Nie, Weigang Zhao, Lijie Du, Research on TBM parameter optimization based on failure probability, Engineering Failure Analysis, Volume 167, Part B, 2025, 109036, https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109036.
3. Грінченко Г.С., Тріщ Ю.В., Грінченко В.В., Багаєв І.О., Фатєєва Л.Ю. Підходи щодо оцінювання ризиків функціонування систем об’єктів різного призначення. Машинобудування: Збірник наукових праць. 2022. №29. С. 70 -79. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-70-79.
4. Torregosa, R.F. and Hu, W. (2013), Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 36: 1092-1101. https://doi.org/10.1111/ffe.12103
5. R. Bachar, A. Urlainis, K-C. Wang, I.M. Shohet, Optimal allocation of safety resources in small and medium construction enterprises, Safety Science, Volume 181, 2025, 106680, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106680.
6. Miguel Saiz, Laura Calvet, Angel A. Juan, David Lopez-Lopez, A simheuristic for project portfolio optimization combining individual project risk, scheduling effects, interruptions, and project risk correlations, Computers & Industrial Engineering, Volume 198, 2024, 110694, https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110694.
7. Методика управління ризиками для системи управління якістю при виготовленні виробів медичного призначення / А. М. Денисенко [и др.] // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – Вип. 3 (55). – С. 25–30.

8. Оцінювання ризиків функціонування системи управління якістю (ДСТУ ISO 9001:2015) вищих навчальних закладів / Р. М. Тріщ, Г. С. Кіпоренко, Н. І. Кім, А. М. Денисенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2016. – Вип. 2 (38). – С. 133–136.
9. Y. Chen, Z. Tian, C. Roberts, S. Hillmansen and M. Chen, "Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 958-968, Sept. 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.3047512.
10. Chu, C.; Yang, W.; Chen, Y. Dynamic Fault Tree Generation and Quantitative Analysis of System Reliability for Embedded Systems Based on SysML Models. *Sensors* **2024**, *24*, 6021. https://doi.org/10.3390/s24186021
11. Michael Roth, Moritz Wolf, Udo Lindemann, Integrated Matrix-based Fault Tree Generation and Evaluation, Procedia Computer Science, Volume 44, 2015, Pages 599-608, https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.027.
12. M. Roth, C. von Beetzen and U. Lindemann, "Matrix-based multi-hierarchy fault tree generation and evaluation," *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, Orlando, FL, USA, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYSCON.2016.7490535.
13. Markulik, Š.; Šolc, M.; Blaško, P. Use of Risk Management to Support Business Sustainability in the Automotive Industry. *Sustainability* **2024**, *16*, 4308. https://doi.org/10.3390/su16104308
14. Nektarios Karanikas, Haroun Zerguine, Redefining health, risk, and safety for occupational settings: A mixed-methods study, *Safety Science*, Volume 181, 2025, 106698, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106698.
15. Petroutsatou, K., Antoniou, F. & Markoulatos, E.S. Qualitative prioritization of accident risks in the mining industry. *Life Cycle Reliab Saf Eng* **13**, 483–503 (2024). https://doi.org/10.1007/s41872-024-00276-4
16. Kumar, M., Epiphaniou, G. & Maple, C. Comprehensive Threat Analysis in Additive Manufacturing Supply Chain: A Hybrid Qualitative and Quantitative Risk Assessment Framework. *Prod. Eng. Res. Devel.* **18**, 955–973 (2024). https://doi.org/10.1007/s11740-024-01283-1
17. D.C.P. Peacock,The certainty matrix for fault data and interpretations, *Geothermics*, Volume 125, 2025, 103197, https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103197.
18. Черняк О. М., Лис Ю. С., Грінченко Г. С., Каницька І. В. Багатокритеріальне оцінювання умов праці на виробництві. Вісник Національного тех-нічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 3 (5). С. 28-33.
19. Kenneth Otárola, Leandro Iannacone, Roberto Gentile, Carmine Galasso, Multi-hazard life-cycle consequence analysis of deteriorating engineering systems,Structural Safety, Volume 111, 2024, 102515, https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102515.
20. ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines. Published (Edition 2, 2018): Geneva, Switzerland, 2018.
21. IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques: Geneva, Switzerland, 2019.
22. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements: Geneva, Switzerland, 2015.
23. ISO 45001; Occupational Health and Safety Management Systems. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2018.
24. Hrinchenko, H.; Koval, V.; Shmygol, N.; Sydorov, O.; Tsimoshynska, O.; Matuszewska, D. Approaches to Sustainable Energy Management in Ensuring Safety of Power Equipment Operation. *Energies* **2023**, 16, 6488. https://doi.org/10.3390/en16186488
25. Hrinchenko, H.; Prokopenko, O.; Shmygol, N.; Koval, V.; Filipishyna, L.; Palii, S.; Cioca, L.-I. Sustainable Energy Safety Management Utilizing an Industry-Relative Assessment of Enterprise Equipment Technical Condition. *Sustainability* **2024**, *16*, 771. https://doi.org/10.3390/su16020771
26. Šolc, M.; Blaško, P.; Girmanová, L.; Kliment, J. The Development Trend of the Occupational Health and Safety in the Context of ISO 45001:2018. *Standards* **2022**, *2*, 294-305. https://doi.org/10.3390/standards2030021
27. Widianti, T., Firdaus, H. and Rakhmawati, T. (2024), "Mapping the landscape: a bibliometric analysis of ISO 31000", International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 41 No. 7, pp. 1783-1810. https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2023-0287
28. Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. Part II: A new approach. URL: https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/risk-assessment-methodologies-critical-infrastructure-protection-part-ii-new-approach . (Last accessed: 17 October 2024)

Стаття надійшла для редакції 21. 10. 2024 Стаття рекомендована до друку 22.11.2024

[1]**HRINCHENKO H.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: h.s.hrinchenko@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1]**KIPORENKO O.,**
student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: kiporenko.oleksii22@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1683-2640
[1]**NEHODOV S.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: titansv2017@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3561-6924
[1]**LYSENKO A.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: dagost@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3916-8029
[1]**MAZORCHUK K.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:ekaterina.mazorchuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0007-3916-8029
[1]**NOS R.**,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: nosruslan@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0769-4872
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

DEVELOPMENT OF A REGULATORY APPROACH TO RISK ASSESSMENT OF ENERGY UTILITIES

The article considers approaches to risk assessment in the functioning of urban energy systems to develop an effective management strategy based on the regulatory approach. The article analyses risk assessment approaches and highlights the normative approach as a basis for risk management, which requires the introduction of a qualitative assessment of the impact of external and internal factors provided for by regulatory documents. The main problems of risk management and assessment are analyzed and identified, in particular, the need for an integrated approach to risk assessment and the importance of assessing not only the functioning of individual components of the system, but also the interrelationships between them and the processes that occur within the system and have an impact on both the technical system and the environment. It is proposed to consider the consequences of violating normal operating conditions of power equipment as a risk for the qualimetric assessment of technical systems through the possibility of restoration and modernization of equipment. As a model for managing the risks of technical systems, a model based on the intensity of failures and the probability of restoring the power system's performance is proposed. A scale for assessing the occurrence of an undesirable event by the level of safety and the consequences of these events is proposed by taking into account the restoration of both the technical component of the system (taking into account the restoration time) and the environmental consequences and the possibilities of their elimination, taking into account the time and level of damage. For assessment and management purposes, the impact of external factors on the functioning of the technical system is analyzed, and an assessment using risk matrices is proposed. This approach makes it possible to assess the effectiveness of the system's implementation, organization, and operation and, most importantly, to manage and improve the system's functioning at any stage of its life cycle.

KEYWORDS: *risk, regulatory approach, energy enterprises, management, assessment, risk matrices*.

In cites: Hrinchenko H, Kiporenko O, Nehodov S, Lysenko A, Mazorchuk K, Nos R. (2024). Development of a regulatory approach to risk assessment of energy enterprises. *Engineering*, (34), 17-30. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-02 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Referenses:

1. Trishch, R, Nechuiviter, O, Hrinchenko, H, Bubela, T, Riabchykov, M & Pandova, I 2023, ‘Assessment of safety risks using qualimetric methods’, *MM Science Journal*, 6668. DOI: 10.17973/MMSJ.2023_10_2023021

2. Qian Zhang, Yaoqi Nie, Weigang Zhao & Lijie Du 2025, 'Research on TBM parameter optimization based on failure probability', *Engineering Failure Analysis*, Vol. 167, Part B, 109036, DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109036.
3. Hrinchenko, HS, Trishch, YuV, Hrinchenko, VV & Bahaiev, IO 2022, [Fatieieva L.Iu. Approaches to the risk assessment of the functioning of a system of objects of various purposes], Engineering, iss 29, Pp. 70 -79. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-70-79.
4. Torregosa, RF & Hu, W 2013, 'Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes', *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, No 36, Pp. 1092-1101. DOI: https://doi.org/10.1111/ffe.12103
5. Bachar, R, Urlainis, A, Wang, K-C & Shohet, IM 2025, 'Optimal allocation of safety resources in small and medium construction enterprises', *Safety Science*, Vol. 181, 106680, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106680.
6. Saiz, M, Calvet, L, Juan, Angel A. & Lopez-Lopez, D 2024, 'A simheuristic for project portfolio optimization combining individual project risk, scheduling effects, interruptions, and project risk correlations', *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 198, 110694, DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110694.
7. Denysenko, AM et al 2019, [Risk management methodology for quality management systems in the manufacture of medical devices], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 3 (55), Pp. 25–30.
8. Trishch, RM, Kiporenko, HS, Kim, NI & Denysenko, AM 2016, 'Otsiniuvannia ryzykiv funktsionuvannia systemy upravlinnia yakistiu (DSTU ISO 9001:2015) vyshchykh navchalnykh zakladiv' [Risk assessment of the functioning of the quality management system (SSU ISO 9001:2015) higher educational institutions], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku*, iss. 2 (38), Pp. 133–136.
9. Chen, Y, Tian, Z, Roberts, C, Hillmansen, S & Chen, M 2021, 'Reliability and Life Evaluation of a DC Traction Power Supply System Considering Load Characteristics', *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 958-968, DOI: 10.1109/TTE.2020.3047512.
10. Chu, C, Yang, W & Chen, Y 2024, 'Dynamic Fault Tree Generation and Quantitative Analysis of System Reliability for Embedded Systems Based on SysML Models', *Sensors*, iss *24*, p. 6021. DOI: https://doi.org/10.3390/s24186021
11. Roth, M, Wolf, M & Lindemann, U 2015, 'Integrated Matrix-based Fault Tree Generation and Evaluation', *Procedia Computer Science*, Vol. 44, Pp. 599-608, DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.027.
12. Roth, M, Beetzen, C. Von & Lindemann, U 2016, 'Matrix-based multi-hierarchy fault tree generation and evaluation', *Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*, pp. 1-7, DOI: 10.1109/SYSCON.2016.7490535.
13. Markulik, Š, Šolc, M & Blaško, P 2024, 'Use of Risk Management to Support Business Sustainability in the Automotive Industry', *Sustainability*, iss *16*, Pp. 4308. DOI: https://doi.org/10.3390/su16104308
14. Karanikas, N & Zerguine, H 2025, 'Redefining health, risk, and safety for occupational settings: A mixed-methods study', *Safety Science*, Vol. 181, 106698, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106698.
15. Petroutsatou, K, Antoniou, F & Markoulatos, ES 2024, 'Qualitative prioritization of accident risks in the mining industry', *Life Cycle Reliab Saf Eng*, Pp. 483–503. DOI: https://doi.org/10.1007/s41872-024-00276-4
16. Kumar, M, Epiphaniou, G & Maple, C 2024, 'Comprehensive Threat Analysis in Additive Manufacturing Supply Chain: A Hybrid Qualitative and Quantitative Risk Assessment Framework', *Prod. Eng. Res. Deve*, Iss 18, Pp. 955–973. DOI: https://doi.org/10.1007/s11740-024-01283-1
17. Peacock, DCP 2025, 'The certainty matrix for fault data and interpretations', *Geothermics*, Vol. 125, p. 103197, DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103197.
18. Cherniak, OM, Lys, YuS, Hrinchenko, HS & Kanytska, IV 2020, 'Bahatokryterialne otsiniuvannia umov pratsi na vyrobnytstvi' [Multi-criteria evaluation of employment conditions in production], *Visnyk Natsionalnoho tekh-nichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, No 3 (5), Pp. 28-33.
19. Otárola, K, Iannacone, L, Gentile, R & Galasso, C 2024, 'Multi-hazard life-cycle consequence analysis of deteriorating engineering systems', *Structural Safety*, Vol. 111, 102515, DOI: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2024.102515.
20. International Organization for Standardization 2018, ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines, Geneva, Switzerland.
21. International Organization for Standardization 2019, IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques, Geneva, Switzerland.
22. International Organization for Standardization 2015, ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements, Geneva, Switzerland.

23. International Organization for Standardization 2018, ISO 45001; Occupational Health and Safety Management Systems, Geneva, Switzerland.
24. Hrinchenko, H, Koval, V, Shmygol, N, Sydorov, O, Tsimoshynska, O & Matuszewska, D 2023, 'Approaches to Sustainable Energy Management in Ensuring Safety of Power Equipment Operation', *Energies*, iss 16, 6488. DOI: https://doi.org/10.3390/en16186488
25. Hrinchenko, H, Prokopenko, O, Shmygol, N, Koval, V, Filipishyna, L, Palii, S & Cioca, L.-I 2024, 'Sustainable Energy Safety Management Utilizing an Industry-Relative Assessment of Enterprise Equipment Technical Condition', *Sustainability*, iss *16*, p. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/su16020771
26. Šolc, M, Blaško, P, Girmanová, L & Kliment, J 2022, 'The Development Trend of the Occupational Health and Safety in the Context of ISO 45001:2018', *Standards*, no *2*, Pp. 294-305. DOI: https://doi.org/10.3390/standards2030021
27. Widianti, T, Firdaus, H & Rakhmawati, T 2024, 'Mapping the landscape: a bibliometric analysis of ISO 31000', *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 41, no. 7, pp. 1783-1810. DOI: https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2023-0287
28. n.d,, *Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. Part II: A new approach*, viewed 17.10.2024 <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/risk-assessment-methodologies-critical-infrastructure-protection-part-ii-new-approach>

The article was received by the editors 10/21/2024
The article is recommended for printing 11/22/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-03
УДК (UDC): 519.2:621.658.512

[1]**Г.С. ГРІНЧЕНКО,** кандидат техн. наук,
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
mail: h.s.hrinchenko@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1]**В.В. ГРІНЧЕНКО,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: greenchenko1234@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5721-9175
[1]**М.С. КОЗЛОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: max_kozlov98@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8954-268X
[1]**Є.В. ГЕРАСИМОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: zluger@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4026-2796
[1]**С.О. ЗАХАРОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: zaharov.lex@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8192-9126
[2]**О.А. ТЕСЛОВ,**
аспірант кафедри мехатроніки та електротехніки
e-mail: trich_@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3673-9117
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.
[2]*Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут"*
17 вул. Вадима Манька, Харків, 61070, Укріїна

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ШЛЯХОМ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ ТОЧНОСТІ

В статті запропоновано методику до оцінювання якості оброблюваних деталей шляхом визначення закону розподілу точності дійсних розмірів деталей. Знання закону розподілу випадкових величин розсіювання дійсних розмірів деталей після механічної обробки є важливим, бо це дає можливість управляти якістю по малих вибірках. Для визначення закону розподілу пропонується використовувати криві Пірсона. На масових експериментах перевірено гіпотезу про відповідність законів розподілу певним квалітетом точності. Пропонується для визначення закону розподілу дійсних розмірів після механічної обробки використовувати криві Пірсона. Надано формули та методику для визначення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу за емпіричними значеннями. Проведений аналіз з використанням масових експериментів підтвердив дослідження в тому, що при грубих методах обробки закон розподілу дійсних розмірів деталей близький до нормального, а при точних методах обробки - до закону Сімпсона і рівної ймовірності. Для розподілу рівної ймовірності квадрат асиметрії дорівнює 0, а ексцес дорівнює 1.8. Для розподілу Сімпсона квадрат асиметрії дорівнює 0, а ексцес дорівнює 2.4

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *якість технології, точність, механічне оброблення, малі вибірки.*

Як цитувати: Грінченко Г. С., Грінченко В. В., Козлов М. С., Герасимов Є. В., Захаров С. О., Теслов О. А. Оцінювання якості механічного оброблення шляхом визначення закону розподілу точності. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 31-38. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-03

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

Одним із найважливіших показників якості в технології машинобудування є точність механічної обробки. Будь-який технологічний процес містить низку організаційних, технологічних і технічних заходів, що забезпечують задану точність

© Грінченко Г. С., Грінченко В. В., Козлов М. С., Герасимов Є. В., Захаров С. О., Теслов О. А., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

обробки, реалізація їх на конкретних робочих місцях є умовою необхідною, але не достатньою для забезпечення заданої точності обробки. Для досягнення високої точності механічної обробки необхідно враховувати комплекс чинників, що впливають на кінцевий результат. Фактична точність залежить від безлічі різних чинників, результат дії яких спрогнозувати дуже важко. До них належать жорсткість технологічної системи «станок–пристосування–інструмент–заготовка», теплові деформації, вібрації, знос інструменту що ріже, а також стабільність режимів обробки. Крім того, важливу роль відіграють точність вимірювань і контроль геометричних параметрів виробів на всіх етапах технологічного процесу. Результатом впливу чинників є розсіювання дійсних розмірів, яке вивчають за допомогою законів розподілу.

Забезпечення заданої точності обробки вимагає системного підходу, який поєднує ретельне планування технологічного процесу, контроль якості на кожному етапі, удосконалення технологічного оснащення та застосування сучасних методів вимірювання і моніторингу параметрів обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Однією з ключових тенденцій у сучасному машинобудуванні є досягнення високих стандартів точності та якості обробки поверхонь, що обумовлено жорсткими вимогами до надійності та довговічності деталей в умовах їх експлуатації. Це стосується як підвищення точності геометричних параметрів, так і забезпечення оптимальних фізико-механічних властивостей поверхневого шару, таких як твердість, зносостійкість та опір корозії [1-3].

Для досягнення цих цілей активно впроваджуються новітні технології механічної обробки, зокрема: високоточне шліфування та полірування, лазерна та електроіскрова обробка, методи контрольованого пластичного деформування, а також автоматизація виробничих процесів із використанням числового програмного керування та інтеграція систем моніторингу якості [4-7].

Крім того, розробка інноваційних матеріалів для різальних інструментів [8,9] та вдосконалення мастильно-охолоджувальних рідин сприяють зменшенню зношування інструменту й досягненню більш стабільних результатів обробки [10,11]. Всі ці аспекти дозволяють підвищити ефективність виробничих процесів та адаптувати їх до потреб сучасних ринків.

Разом з тим, підвищення якості та точності у машинобудуванні з точки зору практичних підходів ґрунтується на теоретичних даних статистичного аналізу. Так, у роботі [12] досліджено підходи до оцінки моделі точності виготовлення деталей з урахуванням її адекватності. Для перевірки адекватності запропоновано застосовувати чутливу характеристику, яка дозволяє точніше описати закони розподілу. Масові експерименти підтвердили гіпотезу про відповідність законів розподілу окремим видам механічної обробки та щодо закону нормального розподілу відповідає розподіл дійсних розмірів деталей у разі грубих квалітетів (восьмого і грубіше). За сьомого квалітету, розсіювання розмірів підпорядковується закону Сімпсона, а за більш високої точності обробки, закону рівної ймовірності [13, 14]. Це пояснюють фізичним сенсом, оскільки під час виготовлення деталей грубих квалітетів виникає велика кількість похибок (розмірне спрацьовування інструменту, нерівномірність припуску заготовок, неоднорідність поверхневого шару заготовок та ін.), вплив кожної незначний. Якщо на дійсний розмір впливає закономірно мінлива похибка, що зростає спочатку уповільнено, а потім прискорено, то розподіл розмірів відбувається за законом Сімпсона. Цей розподіл може мати місце за спільної дії розмірного зносу інструменту що ріже з сильно вираженою фазою початкового зносу і збільшення сили різання наприкінці стійкості інструменту в результаті його прогресуючого затуплення [8-10]. За таких умов кількість чинників зменшується, оскільки процес механічного оброблення є напівчистовим або остаточним, під час якого безліч чинників

нейтралізувалися на попередній операції (чорновій).

Для похибок, що рівномірно зростають (похибки, спричинені розмірним зносом різального інструменту), розподіл відбувається за законом рівної ймовірності. Наприклад, у разі усталеного зносу різального інструменту зменшення його розмірів у часі підпорядковується прямолінійному закону, що відповідно збільшує або зменшує діаметр оброблюваних заготовок [2, 8, 9, 12]. Знання закону розподілу дуже важливе для розв'язання практичних задач у технології машинобудування, тому що це основна умова для розв'язання цих задач за малими вибірками. Також, за відомого закону розподілу значно спрощується метод розв'язування практичних задач за рахунок застосування параметричних критеріїв, які забезпечені методично і табульовані.

У процесі аналізу виділено ключові проблеми виробництва деталей, зокрема чинники, що впливають на якість технологічних процесів [15-17]. Оцінювання таких чинників є складним завданням, вирішення якого здійснюється шляхом використання параметрів розсіювання фактичних розмірів, що досліджуються за допомогою законів розподілу. Це дозволяє прогнозувати відхилення, підвищувати точність обробки та забезпечувати високу якість продукції.

Метод визначення закону розподілу розсіювання розмірів деталей після обробки на налаштованих верстатах

Для визначення закону розподілу існує кілька підходів. Перший заснований на математичному аналізі, в основі якого лежить підбір відповідної функції для опису емпіричного розподілу. Для визначення того, наскільки правильно ця функція описує дослідний розподіл, використовують різні критерії згоди (Пірсона, Колмогорова, Мізеса та ін.).

Другий підхід ґрунтується на тому, що кожному теоретичному закону розподілу відповідають цілком певні умови функціонування технологічних процесів. Знаючи ці умови, можна знайти відповідні їм закони розподілу. Цей підхід дістав свій розвиток у роботах А.Б. Яхіна, Н.А. Бородачова, Б.В. Гнєденка, А.М. Гаврилова та ін.

Ще один підхід був представлений англійською школою математичної статистики (Ф. Гальтон, К. Пірсон, Р. Фішер), що пішла шляхом побудови родин сімейств інтерполяційних кривих розподілу, які не мають обґрунтованого зв'язку з реальними умовами виникнення досліджуваних розподілів. Закон Гауса в цій схоластичній «системі», запропонованій і розробленій К. Пірсоном, було зведено до ролі одного з численних різновидів можливих математичних кривих. Систему кривих розподілу детально розробили, забезпечили великими довідковими і розрахунковими таблицями, що полегшувало практичне їх використання. Розглянемо цей підхід більш детально.

Щільність імовірності $y = f\left(x\right)$, графік якої належить сімейству кривих К. Пірсона, є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dx} = -\frac{x + c_1}{c_0 + c_1 x + c_2 x^2} \qquad (1)$$

де початком відліку для x слугує середнє значення.

Відповідно до розподілу коренів квадратного тричлена $c_0 + c_1 x + c_2 x^2$ розрізняють 12 типів розподілів Пірсона. Вид розв'язку рівняння (1) залежить від постійних величин, які пов'язані простими співвідношеннями з моментами відповідного розподілу ймовірностей:

$$c_0 = \frac{\sigma^2\left(4\eta_2 - 3\eta_1\right)}{2\left(5\eta_2 - 6\eta_1 - 9\right)},$$

$$c_1 = \frac{\sigma\sqrt{\eta_1\left(\eta_2 + 3\right)}}{2\left(5\eta_2 - 6\eta_1 - 9\right)},$$

$$c_2 = \frac{2\eta_2 - 3\eta_1 - 6}{2\left(5\eta_2 - 6\eta_1 - 9\right)},$$

де

$$\eta_1 = \mu_3^2 / \mu_2^3, \quad \eta_2 = \mu_4 / \mu_2^2,$$

$$\mu_k = \int_{l_1}^{l_2} x^k f(x) dx, \quad \ldots k = 2,3,4 \ldots$$

$$(\mu_0 = 1, \mu_1 = 0).$$

Величини l_1 і l_2 є нижньою і верхньою межами природної області визначення щільності $f(x)$.

Звідси випливає, що розподіл Пірсона повністю визначається першими чотирма моментами. Тому достатньо знайти коефіцієнт асиметрії та коефіцієнт ексцесу, щоб визначити тип цієї кривої. Таким чином, якщо вздовж осей декартової системи координат відкладати відрізки, що відповідають величинам η_1 і η_2, то в площині η_1, η_2 різним типам кривих *К*. Пірсона відповідатимуть області, криві та точки.

На рисунку 1 представлено область площини (η_1, η_2), де η_1 - квадрат коефіцієнта асиметрії, η_2 - коефіцієнт ексцесу. Під час вибору моделі в цьому випадку пропонується використовувати істотну відмінність різних класів розподілів за скошеністю та острівцем.

Для вибору моделі за такого підходу необхідно за вибіркою великого обсягу обчислити оцінки показників асиметрії b_1 та ексцесу b_2 і відшукати точку на рис. 1, що відповідає отриманим оцінкам. За великих вибірок обчислення оцінок b_1 і b_2 не складає труднощів:

$$\sqrt{b_1} = \frac{\mu_3^*}{\left(\mu_2^*\right)^{3/2}}; \quad b_2 = \frac{\mu_4^*}{\left(\mu_2^*\right)^2},$$

μ_k^* - оцінка центрального моменту випадкової величини k - го порядку, яка має вигляд:

$$\mu_k^* = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{X}\right)^k,$$

де n об'єм вибірки та $\bar{X}$ вибіркова середня

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i$$

Використовуючи масові випробування щодо точності механічного оброблення, було знайдено b_1 і b_2. Усі масові випробування підтвердили дослідження Маталіна А.О. в тому, що в разі грубих методів оброблення закон розподілу дійсних розмірів деталей близький до нормального, а в разі точних методів оброблення - до закону Сімпсона і рівної ймовірності. Моделі цих законів розподілу належать області першого типу кривої Пірсона, оскільки для нормального розподілу квадрат асиметрії дорівнює 0, а ексцес дорівнює 3. Для розподілу рівної ймовірності квадрат асиметрії дорівнює 0, а ексцес дорівнює 1.8. Для розподілу Сімпсона квадрат асиметрії дорівнює 0, а ексцес дорівнює 2.4 (див. рис. 1).

Висновки

У роботі запропоновано застосовувати криві Пірсона для визначення закону розподілу дійсних розмірів деталей після механічної обробки. Запропоновано методику для розрахунку коефіцієнтів асиметрії та ексцесу на основі емпіричних даних, що дозволяє точно оцінити характер розподілу.

Аналіз масових експериментів підтвердив висновки:

Для грубих методів механічної обробки розподіл дійсних розмірів наближається до нормального закону.

Для точних методів спостерігається відповідність закону Сімпсона або рівної ймовірності.

Запропоновані підходи демонструють практичну цінність у підвищенні точності та надійності прогнозування якості механічної обробки. Використання кривих Пірсона дозволяє глибше дослідити

закономірності розсіювання розмірів та забезпечити оптимізацію технологічних процесів у машинобудуванні.

Отримані результати мають перспективи для впровадження у виробництво, зокрема в автоматизовані системи контролю якості, що забезпечить підвищення ефективності виробничих процесів і конкурентоспроможності продукції.

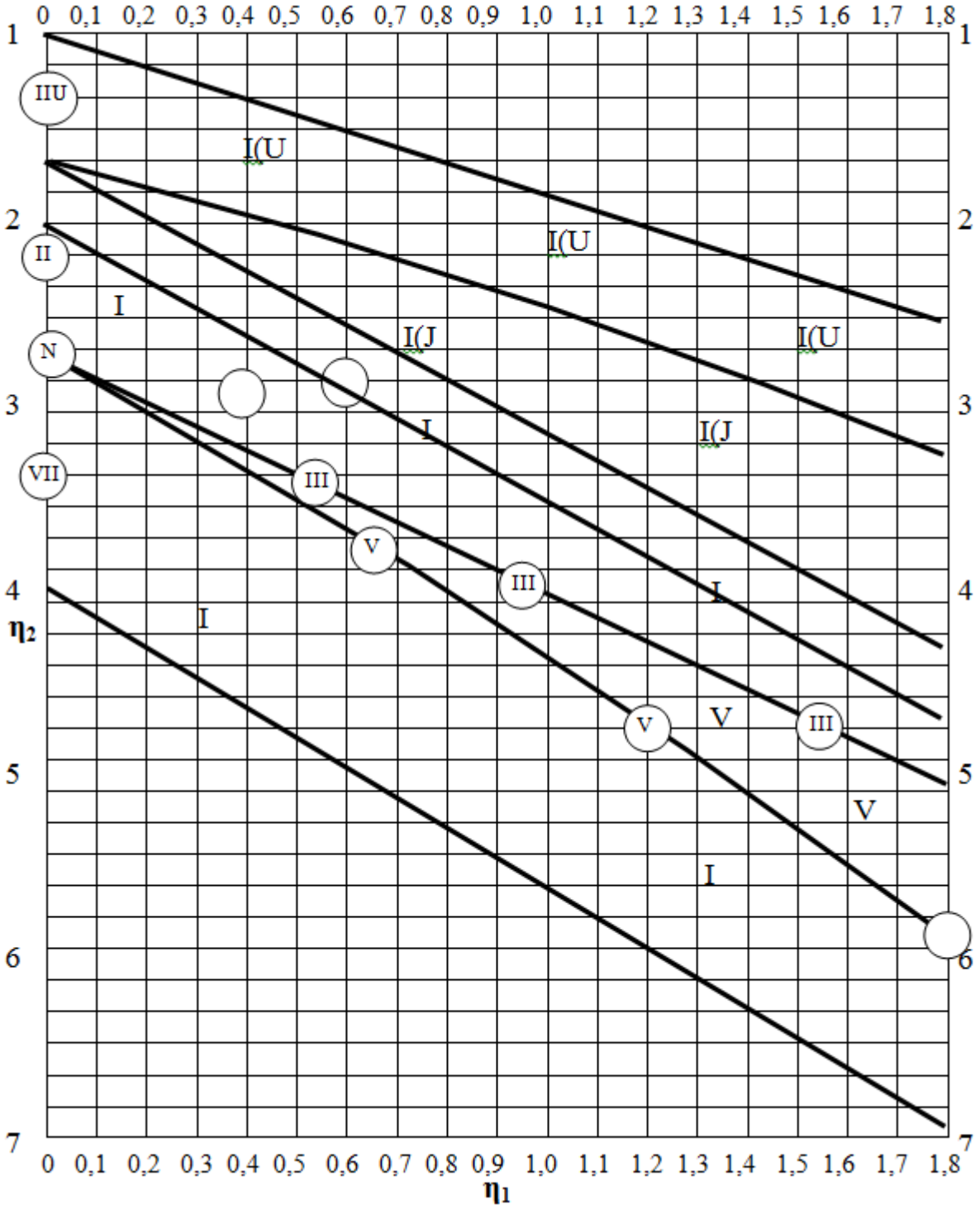


Рис.1- Області в площині (η_1, η_2) для різних розподілів

Fig. 1- Regions in the plane (η_1, η_2) for different distributions

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Кальченко, В. В., Сіра, Н. М., Кальченко, Д. В., & Аксьонова, О. О. (2021). Дослідження процесу фрезерування циліндричних поверхонь зі схрещеними осями інструмента та вала. *Технічні науки та технології*, (4(14), 018–027. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4(14)-18-27
2. Бурдейна В.М., Грінченко Г.С., Артюх С.М., Тріщ А.Р. (2021) Точність координувати отворів малого діаметру з напрямком різального інструменту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* № 2 (8). С.9-14. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02
3. Грінченко Г.С., Теслов О., Козлов М.С., Марченко О.О., Захаров С.О., Герасимов Є.В. (2022) Алгоритм проектування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ. *Машинобудування: Збірник наукових праць.* №29. С. 50 -61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
4. Ciszak, O., & Kolos, V. O. (2024). Intensification of the technological process of processing bracket-type details. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (1 (55), 102-110. https://doi.org/10.32782/msnau.2024.1.14
5. Pukhovskiy, E. S., Prykhodko, V. P., & Gladsky, M. M. (2023). Processing of large-sized parts of hydro pressing and mining equipment. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, (1 (51), 66-74. https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.11
6. Kupriyanov, O., Trishch, R., Dichev, D., Hrinchenko, H. (2024) Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_34
7. Кругляк, І.В & Середа, Б.П. (2022). Моделювання та оптимізація отримання зносостійких покриттів з використанням технологіЇ ECD. Математичне моделювання. 49-56. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268383
8. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2023). Особливості фрезерної обробки композитних матеріалів. Аналітичний огляд. *Технічна інженерія*, (1(91), 92–100. https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-92-100
9. Радкевич, С. І., Глембоцька, Л. Є., Мельничук, П. П., & Кирилович, В. А. (2022). Конструктивне рішення торцевих фрез зі змінними непереточуваними пластинами для обробки плоских поверхонь деталей з чавунів. *Технічна інженерія*, (1(89), 45–54. https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-45-54
10. Чумак, А. О., Мельнійчук, Ю. О., Клименко, С. А., & Клименко, С. А. (2022). Особливості фінішної обробки робочих елементів різальних інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору групи BL. *Технічна інженерія*, (1(89), 55–61. https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-55-61
11. Коваленко , Я. П., & Мельничук , П. П. (2021). Практика використання різального інструменту з ПКНБ групи BL при обробці загартованих сталей. *Технічна інженерія*, (1(87), 21–27. https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-21-27
12. Тріщ Р., Грінченко Г., Катрич О., Яковлем М., Багаєв І., Мірошник Є. (2023). Застосуванням чуттєвої статистичної характеристики для оцінювання якості в машинобудуванні. Машинобудування, (32), с. 46-54. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-46-54
13. Yeryganov, O., Gunchenko, V., & Glebov, V. (2024). Calculation of crank mechanism geometric dimensions according to the results of performance diagram. *Transport Development*, (2(21), 28-34. https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03
14. Kovalevskyy, S., Kovalevska, O., & Kovalenko, O. (2023). Вплив широкосмугових мікроамплітудних вібрацій на процес штампування. *Обробка матеріалів тиском*, (1(52), 118-125. https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)118
15. Роп'як Л., Шовкопляс М., Витвицький В. (2021). Визначення припуску на обробку деталей з хромованим покриттям . *Вісник Черкаського державного технологічного університету* , 26(2), 117-127. https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339
16. Hrinchenko, H., Trishch, R., Kniazieva, V., Antonenko, N. (2024). Improvement of the Assembly Technology Quality by Determining the Closing Link Size Under Thermal Stress. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Piteľ, J. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_31
17. Грінченко Г.С., Козлов М.С., Марченко О.О., Захаров С.О., Герасимов Є.В., Теслов О.А. (2023). Підвищення якості технології складання шляхом визначення величини замикаючої ланки в умовах термовпливу. Машинобудування, (32), с. 5-13. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-5-13

Стаття надійшла для редакції 18.10.2024 Стаття рекомендована до друку 22.11.2024

[1] **HRINCHENKO H.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
mail: h.s.hrinchenko@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1] **HRINCHENKO V.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: greenchenko1234@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5721-9175
[1] **KOZLOV M.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: max_kozlov98@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8954-268X
[1] **HERASYMOV Y.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: zluger@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4026-2796
[1] **ZAKHAROV S.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: zaharov.lex@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8192-9126
[2] **TESLOV O.,**
Postgraduate student of the Department of Mechatronics and Electrical Engineering
e-mail: trich_@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3673-9117
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
[2]*National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*
17 Vadyma Manka st., Kharkiv, 61070, Ukraine

ASSESSMENT OF MACHINING QUALITY BY DETERMINING THE LAW OF ACCURACY DISTRIBUTION

The article proposes a methodology for assessing the quality of machined parts by determining the distribution law of the accuracy of the actual dimensions of parts. Knowledge of the law of distribution of random variables of scattering of actual dimensions of parts after machining is important, as it makes it possible to control quality by small samples. It is proposed that Pearson curves be used to determine the distribution law. The hypothesis that the distribution laws correspond to certain accuracy qualifications has been tested in mass experiments. It is proposed that Pearson's curves be used to determine the distribution law of actual dimensions after machining. The formulas and methods for determining skewness and kurtosis coefficients from empirical values are presented. The analysis carried out using mass experiments confirmed that with rough machining methods, the distribution law of the actual dimensions of parts is close to normal, and with precision machining methods - to Simpson's law and equal probability. For the equal probability distribution, the skewness square is 0, and the kurtosis is 1.8. For the Simpson distribution, the skewness square is 0, and the kurtosis is 2.4.

KEYWORDS*: quality of technology, precision, machining, small samples*

In cites: Hrinchenko H., Hrinchenko V., Kozlov M., Herasymov Y., Zakharov S., Teslov O., (2024). Assessment of the quality of mechanical processing by determining the accuracy distribution law. *Engineering*, (34), 31-38. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-03 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Referenses:

1. Kalchenko, VV, Sira, NM, Kalchenko, DV & Aksonova, OO 2021, [Research into the process of milling cylindrical surfaces with crossed tool and shaft axes.], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, № 4(14), Pp. 018–027. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-4(14)-18-27
2. Burdeina, VM, Hrinchenko, HS, Artiukh, SM & Trishch, AR 2021, [Estimation of accuracy of coordinated small diameter holes with cutting tool direction], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, № 2, Pp. 9–14. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2021.02.02

3. Hrinchenko, HS, Teslov, O, Kozlov, MS, Marchenko, OO, Zakharov, SO & Herasymov, YeV 2022, [Design algorithm of systems for automatic control of mechanical processing accuracy on CNC machines], Engineering, № 29, Pp. 50-61. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-50-61
4. Ciszak, O & Kolos, VO 2024, 'Intensification of the technological process of processing bracket-type details', *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 1 (55), Pp. 102-110. DOI: https://doi.org/10.32782/msnau.2024.1.14
5. Pukhovskiy, ES, Prykhodko, VP & Gladsky, MM 2023, 'Processing of large-sized parts of hydro pressing and mining equipment', *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes,* № 1 (51), Pp. 66-74. DOI: https://doi.org/10.32782/msnau.2023.1.11
6. Kupriyanov, O, Trishch, R, Dichev, D & Hrinchenko, H 2024, 'Experimental Studies on the Form Error Effect of the Part Mounting Surface on the Strength Quality Parameter of the Interference Fit Joints' *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_34
7. Kruhliak, IV & Sereda, BP 2022, [Modeling and optimization of wear-resistant coatings production using ecd technology], *Matematychne modeliuvannia*, Pp. 49-56. DOI: 10.31319/2519-8106.2(47)2022.268383.
8. Tomashevskyi, OO & Balytska, NO 2023, [Features of milling composites. Analytical reviewanalytical review], *Tekhnichna inzheneriia*, № 1(91), Pp. 92–100. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-92-100
9. Radkevych, SI, Hlembotska, LYe, Melnychuk, PP & Kyrylovych, VA 2022, [Design solution of end mills with replaceable non-sharpened plates for processing flat surfaces of cast iron parts], *Tekhnichna inzheneriia*, № 1(89), Pp. 45–54. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-45-54
10. Chumak, AO, Melniichuk, YuO, Klymenko, SA & Klymenko, SA 2022, [Peculiarities of finishing working elements of cutting tools made of polycrystalline cubic boron nitride of BL group], *Tekhnichna inzheneriia*, № 1(89), Pp. 55–61. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-55-61
11. Kovalenko, YaP & Melnychuk, PP 2021, [The practice of using a cutting tool with PCNB group BL in the processing of hardened steels], *Tekhnichna inzheneriia*, № 1(87), Pp. 21–27. DOI: https://doi.org/10.26642/ten-2021-1(87)-21-27
12. Trishch, R, Hrinchenko, H, Katrych, O, Yakovlem, M, Bahaiev, I & Miroshnyk, Ye 2023, [Application of a sensory statistical characteristic for quality assessment in mechanical engineering], Engineering, iss. 32, Pp. 46-54. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-46-54
13. Yeryganov, O, Gunchenko, V & Glebov, V 2024, 'Calculation of crank mechanism geometric dimensions according to the results of performance diagram', *Transport Development*, № 2(21), Pp. 28-34. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03
14. Kovalevskyi, S, Kovalevska, O & Kovalenko, O 2023, [Influence of broadband micro-amplitude vibrations on the stamping process], *Obrobka materialiv tyskom*, № 1(52), Pp. 118-125. DOI: https://doi.org/10.37142/2076-2151/2023-1(52)118
15. Ropiak, L, Shovkoplias, M & Vytvytskyi, V 2021, [Determination of machining allowance for parts with chrome coatings], *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, № 26(2), Pp. 117-127. DOI: https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2021.242339
16. Hrinchenko, H, Trishch, R, Kniazieva, V & Antonenko, N 2024, 'Improvement of the Assembly Technology Quality by Determining the Closing Link Size Under Thermal Stress' *Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham*, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_31
17. Hrinchenko, HS et al 2023, ["Improving the quality of assembly technology by determining the size of the closing link under thermal stress"], Engineering, iss. 32, Pp. 5-13. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-5-13

The article was received by the editors 10/18/2024
The article is recommended for printing 11/22/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-04
УДК: 371.142

[1]**Г.С. ГРІНЧЕНКО,** кандидат техн. наук**,**
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологі
e-mail: hrinchenko@uipa.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1]**А.М. МАЦЬКО**,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: am.matsko@knmu.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0559-304X
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ІНТЕГРАЦІЯ КВАЛІМЕТРИЧНИХ ПІДХОДІВ У СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОСВІТИ

В умовах безперервного зростання обсягу інформації та швидких змін у галузі технологій, особливо важливо мати ефективні методи оцінювання, які можуть забезпечити високий рівень точності та об'єктивності. Кваліметрія, що фокусується на кількісних методах оцінки якості, надає можливість систематичного та науково обґрунтованого підходу до аналізу якості освітніх процесів і продуктів. Використання кваліметричних методів у поєднанні з сучасними інформаційно-вимірювальними технологіями дозволяє забезпечити більш точне та надійне оцінювання, що є критично важливим для ефективного управління та вдосконалення освітніх систем.

У статті досліджується інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології. Розглядаються можливості застосування кваліметричних методів для підвищення точності та об'єктивності оцінювання якості освітніх процесів і продуктів. Проаналізовано потенціал цих інструментів у модернізації, підвищенні ефективності управління якістю та створенні умов для постійного вдосконалення процесу діяльності. Наведено приклади впровадження кваліметричних методів, які підтверджують їх ефективність і перспективність. Результати дослідження демонструють, що інтеграція кваліметричних підходів сприяє значному покращенню точності, надійності та об’єктивності оцінювання різного роду параметрів.

Розглядається кваліметрія як наука про кількісне оцінювання якості, що пропонує ефективні інструменти для аналізу якості освітніх процесів і продуктів. Автори досліджують методи та підходи кваліметрії, їхню технічну реалізацію та інтеграцію в сучасні інформаційно-вимірювальні технології. Інтеграція кваліметричних підходів в інформаційно-вимірювальні технології передбачає застосування статистичних методів, математичних моделей та спеціалізованого програмного забезпечення для збору, обробки та аналізу даних. Це дозволяє отримувати об'єктивні й репрезентативні результати, які можуть бути використані для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Таким чином, забезпечується не тільки підвищення точності та об'єктивності оцінювання, але й створюються передумови для постійного покращення якості освітнього процесу шляхом виявлення сильних та слабких сторін, визначення напрямів для вдосконалення та впровадження інновацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *кваліметричні методи, оцінка, якість, методологія, показник якості, педагогічна оцінка, кваліметрична оцінка.*

Як цитувати: Грінченко Г. С., Мацько А. М. Інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології освіти. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 39-50. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-04

Постановка проблеми

Одним із ключових аспектів кваліметрії є встановлення зв'язку між вимірюваним показником якості та його оцінкою на безрозмірній шкалі, подібне завдання вимагає ретельного дослідження об'єкта оцінки та розроблення об'єктивних математичних залежностей.

Один з основних викликів полягає у тому, що показники якості не завжди розподілені рівномірно та не завжди мають лінійну математичну залежність з їх

© Грінченко Г. С., Мацько А. М., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

оцінкою, тому більшість наявних методик оцінювання якості використовують досить наближені формули, які можуть слабко відображати основні ідеологічні принципи процесу оцінювання. Саме тому аналіз наявних кваліметричних підходів до оцінювання якості має на меті виявлення проблем та можливостей цих методик, а також розробку рекомендацій щодо їх оптимального використання та подальшого вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень

За останні десятиріччя багато науковців приділяло увагу дослідженням пов’язаним з оцінюванням якості кваліметричними методами, але для розуміння самої концепції «кваліметричного вимірювання» необхідно чітко визначити сутність цього поняття. В.П. Мотало та Б.І. Стадник розглядають концептуальне поняття "кваліметричні вимірювання" як значний крок у розвитку сучасних методів вимірювань, вони аргументують, що такі вимірювання поєднують у собі підходи кваліметрії та метрології, що дозволяє ефективно оцінювати якість продукції та послуг з точки зору їхньої відповідності стандартам і вимогам [1]. Кваліметричні вимірювання створюють можливість не лише об'єктивно оцінювати характеристики продукції, а й забезпечують базову інформацію для подальшого аналізу та вдосконалення виробничих процесів. Цей підхід відкриває нові перспективи для підвищення якості продукції та оптимізації виробничих процесів у різних галузях промисловості. Т.О. Лукіна вказує що кваліметрія розглядається як частина теорії управління якістю та теорії прийняття рішень [2]. За словами Т. Лукіної, кваліметрія ґрунтується на виборі найбільш оптимальних методів і засобів впливу на об’єкт з метою підвищення їх здатності задовольняти наявні та майбутні потреби людей. Концептуальні основи кваліметричної оцінки було висвітлено в роботах Р. Задорожної, О. Ануфрієвої, К. Борисенко, Г. Дмитренко, А.Тріщ, О. Катрич, що стало основою для даного дослідження [3-8].

Згідно з висловлюванням Г. Дегтярьової, "для оцінки будь-якої компетентності використовуються критерії, показники та рівні їх сформованості" [9].

Висвітлюючи концепцію кваліметричних вимірювань, у статі були враховані різноманітні підходи та методи, що були запропоновані різними вченими в цій галузі. Аналіз наукових доробок [3-8] свідчить, що кваліметричні вимірювання є інноваційним і перспективним напрямком у розвитку наукових досліджень, оскільки вони дозволяють ефективно оцінювати рівень якості та відповідність продукції стандартам та вимогам якості.

Формулювання цілей статті

Метою даної статті є систематизація та аналіз наявних кваліметричних підходів до оцінювання якості, встановлення їхньої ефективності та можливості застосування в різних сферах.

Виклад основного матеріалу

Кваліметрія, як наука, що досліджує методи вимірювання та оцінювання якості, має широкий спектр підходів, які використовуються для досягнення різноманітних цілей дослідження. У цьому контексті, метод експертних оцінок та метод статистичних випробувань відіграють ключову роль у визначенні якості об'єктів. Для розуміння сучасних тенденцій розвитку кваліметричних методів розглянемо 7 наукових підходів що застосовуються у кваліметрії [10-13].

Метод експертних оцінок базується на знаннях та досвіді фахівців, які оцінюють об'єкт за визначеними критеріями якості. Цей підхід відзначається простотою та доступністю, а також здатністю оцінювати якісні характеристики об'єкта. Однак, серед його основних недоліків варто виділити суб'єктивність оцінок та можливий вплив

зовнішніх факторів. Наприклад, результати оцінки можуть залежати від особистих уподобань експертів, які не завжди відображають об'єктивну якість продукції [14].

Метод статистичних випробувань використовує статистичні методи для оцінки ймовірності того, що об'єкт відповідає вимогам якості. Основними перевагами цього методу є його об'єктивність та можливість оцінювати ймовірність відповідності об'єкта певним стандартам якості. Проте, для його застосування необхідна велика вибірка та існує можливість допущення помилок [15].

Методи вимірювання та оцінювання якості є видом досліджень, що забезпечують об'єктивне та системне розуміння характеристик об'єктів. Вони дозволяють не лише оцінити якість, але й забезпечити вдосконалення та оптимізацію процесів [16].

Метод вимірювання параметрів є одним з найбільш поширених та ефективних, базується на об'єктивних кількісних характеристиках об'єкта, що дозволяє проводити точні та об'єктивні вимірювання. Однак, необхідно враховувати, що не всі характеристики піддаються вимірюванню, та використання відповідних методів та інструментів може бути складним [17,18].

Метод порівняльного аналізу надає можливість оцінити якість об'єкта шляхом порівняння з аналогами або еталонними зразками, він демонструє наочність та простоту, але йому властива складність вибору аналогів або еталонів, а також можливість суб'єктивності [19].

Метод моделювання, у свою чергу, ґрунтується на створенні математичних моделей, що дозволяють оцінювати якість об'єкта за допомогою комп'ютерних розрахунків. Гнучкість та можливість оцінювати складні характеристики є важливими перевагами цього методу, проте йому притаманна складність створення моделей та можливість похибок у процесі моделювання [20].

Метод тестування, як підхід до оцінки якості, передбачає проведення випробувань об'єкта. Цей метод є об'єктивним та може виявити недоліки, але він також трудомісткий та вимагає значних витрат [21].

Метод системного аналізу розглядає об'єкт як систему та оцінює його якість, враховуючи взаємозв'язки та взаємодію елементів. Хоча цей підхід має системні переваги, він також вимагає глибокого розуміння системи та складності в реалізації [22].

Вибір наукового підходу до кваліметричної оцінки залежить від кількох ключових факторів, які визначають придатність і ефективність методу для конкретного дослідження. Різні об'єкти можуть мати різні фізичні, хімічні, біологічні, соціальні або інші характеристики, які потребують специфічного підходу до оцінки. Наприклад, для фізичних об'єктів можуть бути використані методи вимірювання, в той час як для соціальних або емоційних характеристик можуть застосовуватися методи анкетування або спостереження [23]. Якщо мета полягає у визначенні загальної якості, можна використати комплексний метод, що охоплює різні сторони якості. У випадку оцінювання конкретних характеристик варто використовувати спеціалізований метод, що дозволяє докладніше визначити ці характеристики. Також важливо враховувати наявність кваліфікованого персоналу для застосування конкретного методу оцінки якості.

Кваліметричні підходи в освіті виявляються надзвичайно ефективними у контексті інформаційно-вимірювальних технологій, такі підходи поєднують у собі концептуальні принципи педагогіки, вимірювань, математичного моделювання та математичної статистики з широким використанням ІКТ. Вони дозволяють проводити глибокий аналіз та оцінку впливу різних факторів на навчальний процес, розробляти оптимальні стратегії навчання та формувати індивідуальні освітні траєкторії.

Основний внесок наукових досліджень у галузь кваліметрії полягає в ідентифікації різних методів оцінювання, які можуть бути застосовані для визначення якості підготовки фахівців у закладах спрямованих на вивчення інформаційно-вимірювальних технологій. З проведеного аналізу можна виділити три основні групи таких методів (Рис. 1).

Перша група методів, що розглядається, це евристичні методи, які базуються на експертних оцінках, анкетуванні, спостереженні та бесідах. Ці методи дозволяють отримати інформацію від експертів або студентів безпосередньо, що дозволяє отримати широкий обсяг даних.

Друга група - математичні методи, які включають в себе ранжування, t-критерій Стьюдента, коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона тощо. Ці методи базуються на обробці кількісних даних та статистичних методах, що дозволяє проводити об'єктивне порівняння рівнів підготовки.

Третя група - інструментальні методи, які використовують технічні засоби, такі як комп'ютерне тестування, інформаційні та комунікаційні технології. Вони надають можливість проводити швидке та ефективне оцінювання, використовуючи сучасні засоби технологій.

Інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології відкриває широкі можливості для покращення якості навчання та ефективності управління навчальним процесом [4, 5, 9, 11]. Проте, цей процес стикається з рядом викликів, які потребують уваги та розробки стратегій для їх подолання. Один із найбільших викликів полягає у розвитку нових методів аналізу та інтерпретації даних, оскільки обсяги інформації, що збираються в рамках інформаційно-вимірювальних технологій, постійно зростають, необхідно розробляти нові підходи до їх обробки та аналізу, що звісно ж вимагає співпраці між фахівцями з області освіти, інформаційних технологій та статистики для створення інтегрованих методологій оцінки навчальних досягнень. Окрім цього, важливим викликом є забезпечення конфіденційності та безпеки даних, бо в інформаційно-вимірювальних технологіях зберігається велика кількість особистої та конфіденційної інформації про студентів та навчальні заклади, необхідно розробляти ефективні системи захисту цих даних від несанкціонованого доступу та витоку [24].

Рис. 1– Структура класифікації методів кваліметрічної оцінки
Fig.1– The structure of the classification of qualitative assessment methods

Наприклад використовуючи ранжирування можна оцінити ранг підготовки фахівців. Модель ранжування може бути представлена наступною формулою:

$$R = \sum_{i=1}^{n} w^i \times X^i$$

R - загальний ранг;

w^i - вага, яка надається кожному показнику якості;

X^i - значення показника якості;

n - кількість показників якості.

Наприклад, нехай оцінюється якість підготовки фахівців з комп'ютерних наук за такими показниками: успішність випускників на ринку праці (80%), рівень знань з програмування (70%), та навички роботи з базами даних (90%). Ваги w^i, можна встановити, наприклад, як 0.3, 0.4 і 0.3 відповідно. Підставимо значення у формулу:

R=0.3×80%+0.4×70%+0.3×90%=0.24+0.28+0.27=0.79R=0.3×80%+0.4×70%+0.3×90%=0.24+0.28+0.27=0.79

Отже, загальний ранг підготовки фахівців з комп'ютерних наук дорівнює 0.79.

Також у кваліметрії часто використовується, метод кваліметричних співвідношень, наприклад, коли зміна кількості продукції відносно еквівалентна зміні показника якості, щодо ефективного використання продукції. У випадку, коли неможливо визначити коефіцієнти вагомості за допомогою відомих розрахункових методів, застосовується експертний підхід. Варто відзначити, що експертні методи характеризуються точністю результатів. Експерти визначають коефіцієнти вагомості показників якості у балах (за шкалою від п'яти або десяти балів, у частках одиниці та інше). Потім

обчислюється середнє арифметичне значення коефіцієнта, призначеного експертною групою для і-го показника якості, за наступною формулою:

$$\alpha_i = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{ij}$$

де n – число показників якості продукції;

N – число експертів;

a_{ij} – параметри вагомості і-го показника, дані j-м експертом. Нормовані коефіцієнти вагомості розраховують за формулою[18]:

$$m_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^{n}\alpha_i}$$

У такому випадку враховується умова, за якої сума нормованих коефіцієнтів становить одиницю, при цьому жоден із них не може бути рівним нулю. Коефіцієнт вагомості може бути визначений різними методами: за допомогою переваг, ранжування, попарних порівнянь, послідовних порівнянь тощо. Під час обробки результатів експертних оцінок, коли показники ранжуються за зростанням міри важливості або отримують ранги від експертів (за методом переваг або ранжування), значення кожного встановленого коефіцієнта вагомості знаходять за допомогою наступної формули[18]:

$$m_i = \frac{R_i 2^{(1-L)}}{\sum_L R_i 2^{(1-L)}}$$

де R_i – ранг і-го показника або його порядковий номер у таблиці показників;

L – число експертів.

При оцінці показників за їх поступовою важливістю, коли менш суттєві показники розташовуються після більш суттєвих (за методом послідовних порівнянь), коефіцієнти визначаються за допомогою наступної формули [18]:

$$m_i = \frac{R_i 2^{(1-R_i)}}{\sum_L R_i 2^{(1-R_i)}}$$

Загальна теорія кваліметрії розглядає концепції показників якості, які можуть бути одиночними, складними або базовими. В той час як одиночні показники якості стосуються лише однієї властивості об'єкта, складні показники відображають взаємозв'язані аспекти якості. Базові показники якості виступають як посилання в порівняльних оцінках, визначаючи співвідношення відносних показників якості. Відносні показники якості визначають співвідношення між показником якості об'єкта та базовим показником, що виражається у відносних одиницях. Ці показники дозволяють відстежувати зміни індивідуальних значень компетентностей на різних етапах навчального процесу [25-27].

Складний показник утворюється на основі одиночних показників та/або складних показників, і може бути представлений у такий спосіб:

1. Головний показник, який відображає функціональну придатність, а саме компетентність випускника.
2. Зважені середні, які консолідують одиночні та/або складні показники до одного числа, відображаючи окрему якість об'єкта (окрему компетентність) з урахуванням її відносної важливості.

Оскільки стан явища, а саме особистий профіль компетентності, не може бути абсолютно точним у кількісних оцінках, складний портрет визначається різноманітними елементами, діапазоном та рівнем компетентностей, що відображають якісні аспекти студента. Елементи узгоджуються з показниками в структурі індексу індивідуальної компетентності, ці показники можна поділити на дві групи: позитивні, які призводять до зростання значення індексу при зростанні їхніх значень, і негативні, коли цей зв'язок є обернено пропорційним [28].

Інформаційно-вимірювальні технології включають в себе інструменти для збору, обробки та аналізу даних. Інтеграція кваліметричних методів дозволяє підвищити точність оцінок і прийняття рішень. Наприклад, використання системи управління навчанням (LMS) може бути доповнене кваліметричними методами для оцінювання ефективності курсів та успішності студентів [29].

Розглянемо приклад застосування лінійної регресійної моделі для оцінки успішності студентів. Нехай у нас є дані про успішність студентів за такими параметрами: час, витрачений на навчання (X1), відвідуваність занять (X2) і участь у позакласних заходах (X3).

Модель, що описує залежність між цими параметрами та успішністю, у вигляді:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \beta_3 \times x_3 + \epsilon$$

де:

η – успішність;

β_0 - поправка;

β_1, β_2, β_3 - коефіцієнти, які відображають вплив кожного параметра на успішність;

x_1 — час на навчання;

x_2 — відвідуваність;

x_3 — участь у заходах;

ϵ - помилка моделі.

Ця модель дозволяє нам оцінити, наскільки кожен з вказаних параметрів впливає на успішність студентів. Наприклад, позитивне значення коефіцієнта β_1 показує, що збільшення часу, витраченого на навчання, сприяє підвищенню успішності. Аналогічно, значення коефіцієнтів β_2 та β_3 відображають вплив відвідуваності та участі у заходах на успішність студентів відповідно.

Проаналізувавши методи кваліметричної оцінки, запропоновано систематизувати методи відповідно до можливості застосування їх в освіті та придатності до автоматизації. У результаті цього аналізу було виявлено, що деякі методи можуть бути ефективно використані для оцінки якості навчального процесу та результатів навчання студентів, тоді як інші більше підходять для внутрішнього моніторингу та вдосконалення освітніх програм (Таблиця 1)

Таблиця 1

Систематизація методів кваліметричної оцінки

Table 1

Systematization of qualimetric assessment methods

Група методів	Метод	Застосування в освіті	Придатність до автоматизації	Коментарі
Евристичні методи	Експертної оцінки	Оцінювання якості навчальних програм, лекцій	Частково	Можлива суб'єктивність оцінок, залежність від досвіду експертів
	Анкетування	Оцінка задоволеності студентів, зворотний зв’язок	Так	Швидке збирання даних, можлива автоматизація
	Спостереження	Аналіз поведінки студентів під час навчання	Ні	Висока потреба в людських ресурсах
	Бесіди	Оцінка мотивації, потреб студентів	Так	Інформативність залежить від підготовки інтерв'юера
Математичні методи	Ранжування	Оцінка успішності студентів, викладачів	Так	Об'єктивність за наявності великої кількості даних
	t-критерій Стьюдента	Статистичний аналіз даних успішності	Так	Використання для порівняння груп
	Кореляційний аналіз	Визначення взаємозвязків між змінними	Так	Допомагає виявити фактори, що впливають на результати
Інструментальні методи	Компютерне тестування	Оцінка знань студентів	Так	Висока ефективність, можливість масштабування
	ІКТ	Підтримка навчального процесу	Так	Підвищення інтерактивності навчання
Метод порівняльного аналізу	Порівняння з еталонами	Оцінка якості освітніх програм	Частково	Важливо мати чітко визначені стандарти
Метод моделювання	Математичні моделі	Прогнозування результатів навчання	Так	Висока складність, потребує специфічних знань
Метод тестування	Випробування	Перевірка знань, навичок	Так	Трудомісткий, потребує ресурсу
Метод системного аналізу	Системний підхід	Оцінка інтегрованих освітніх систем	Частково	Вимагає комплексного підходу до оцінки

Методи, які включають аналітичні інструменти та алгоритми обробки даних, мають великий потенціал для автоматизації. Вони можуть забезпечити більш точну та об'єктивну оцінку освітніх показників, сприяти виявленню слабких місць у навчальному процесі та допомагати в розробці стратегій для їх усунення. Автоматизація цих методів дозволить знизити вплив людського фактора та підвищити ефективність системи оцінювання.

Одним з таких методів є застосування штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу великих обсягів даних про успішність студентів. Ці технології можуть використовуватися для виявлення закономірностей у навчальних досягненнях, прогнозування майбутніх результатів та надання персоналізованих рекомендацій для покращення успішності. Також вони можуть допомогти в автоматизації процесів зворотного зв'язку між викладачами та студентами, забезпечуючи швидкий та ефективний обмін інформацією.

Крім того, методи, що базуються на статистичному аналізі та моделюванні, можуть бути застосовані для оцінки якості навчальних програм та викладацької діяльності. Вони дозволяють визначити ключові фактори, що впливають на якість освіти, та розробити відповідні заходи для їх покращення. Автоматизація таких методів дозволить знизити навантаження на адміністративний персонал та забезпечити більш оперативну реакцію на зміни в освітньому середовищі.

Таким чином, систематизація методів кваліметричної оцінки за критеріями їх придатності до застосування в освіті та автоматизації є важливим кроком до підвищення якості навчального процесу. Це дозволить не тільки поліпшити контроль за якістю освіти, але й забезпечити її постійний розвиток та вдосконалення, що відповідає вимогам сучасного суспільства та ринку праці.

Висновки

У результаті цього дослідження виявлено, що кваліметричні підходи в контексті інформаційно-вимірювальних технологій (ІВТ), виявляються надзвичайно ефективними. Було виділено три основні групи таких методів: евристичні, математичні та інструментальні. Кожна з них має свої переваги та обмеження і може бути застосована залежно від конкретних умов та завдань оцінювання. Проте, процес інтеграції кваліметричних підходів у сучасні ІВТ також вносить свої виклики. Зокрема, необхідно розвивати нові методи аналізу та інтерпретації даних, забезпечувати конфіденційність та безпеку даних, а також здійснювати співпрацю між фахівцями з різних областей для створення інтегрованих методологій оцінки навчальних досягнень. Розробка ефективних систем захисту даних та постійне вдосконалення методів аналізу даних є важливими завданнями для подальшого розвитку кваліметричних підходів у сфері освіти.

У цьому дослідженні було проаналізовано теорію кваліметрії, що досліджує концепції показників якості та їхній вплив на ефективність освітнього процесу. Зроблено висновок, що показники якості можуть бути різноманітними, включаючи одиночні, складні та базові, і що їх розглядання дозволяє об'єктивно оцінити рівень підготовки студентів. Також було досліджено використання інформаційно-вимірювальних технологій у навчальному процесі та їхню інтеграцію з кваліметричними методами. Показано, що це сприяє підвищенню точності оцінок та ефективності управління навчанням.

Крім того, за допомогою прикладу застосування лінійної регресійної моделі проілюстровано, як математичні методи можуть бути використані для оцінки успішності студентів за різними параметрами. Цей приклад показує важливість аналізу впливу різних факторів на результативність навчання та можливість прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері освіти.

Інтеграція кваліметричних підходів у сучасні інформаційно-вимірювальні технології освіти дозволить підвищити об'єктивність і точність оцінювання якості освітніх процесів і продуктів, щодо використання математичних моделей, таких як регресійний аналіз та дозволять кількісно оцінювати вплив різних факторів на якість освіти і приймати обґрунтовані рішення для покращення освітнього процесу.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Мотало В.П., Мотало А.В, Стадник Б.І. Метрологія, кваліметрія та кваліметричні вимірювання: теорія і практика. Метрологія, кваліметрія та кваліметричні вимірювання: теорія і практика. Випуск 76. 2015.
2. Лукіна Т.О. Кваліметрія // Енциклопедія освіти / Нац. акад. пед. наук України: 2-ге вид, допов. та перероб. Київ : Юрінком Інтер, 2021. – С.437-438.
3. Zadorozhna, R., Kepko, V. Methodology of the project management as a base of qualimetric analysis. Efektyvna ekonomika, No.8, 2021. doi: 10.32702/2307-2105-2021.8.93
4. Ануфрієва О. Л. Кваліметричний підхід до оцінки рівня конкурентоздатності закладу вищої освіти [Електронний ресурс] / О. Л. Ануфрієва // The 4th International scientific and practical conference “Dynamics of the development of world science” Perfect Publishing, Vancouver, Canada. – Vancouver, 2019. – Pp. 73–85. – Режим доступу : https://cutt.ly/pfZUcq2.
5. Борисенко К. Б. Вимірювання сформованості фахових компетентностей майбутніх учителів географії засобами кваліметрії / К. Б. Борисенко // Проблеми інженерно-педагогічної освіти : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2018. – № 61. – С. 23-35.
6. Дмитренко Г. А., Ануфрієва О. Л., Бурлаєнко Т. І., Медвідь В. В. Кваліметрія в управлінні: гуманістичний контекст : навч. посіб. / за заг. ред. Г. А. Дмитренка. Київ : Аграрна освіта, 2016. 335 с.
7. Катрич О. О. Розвиток кваліметричних методів оцінювання процесів систем управління якістю підприємств відповідно до вимог міжнародних стандартів : дис. … канд. техн. наук : 05.01.02 / О. О. Катрич ; Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2015. – 163 с.
8. Катрич О. О., Тріщ А. Р., Денисенко А. М., Діденко Н. В. Кваліметричний інструмент оцінювання якості процесів різної природи. Машинобудування. 2015. № 16. С. 115-121.
9. Дегтярьова Г. А. Розвиток інформаційно-комунікаційної компетентності вчителів філологічних дисциплін у системі післядипломної освіти : монографія / Г. А. Дегтярьова. – Харків : Мачулін, 2016. – 584 с.
10. Ginevicius, R., Trisc, R., Remeikiene, R., Zielinska, A., Strikaite-Latusinskaja, G. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: Ginevičius, R., Trišč, R., Remeikienė, R., Zielińska, A., & StrikaitėLatušinskaja, G. (2022). Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case. Journal of International Studies, 15(1), 230-249. doi:10.14254/2071-8330.2022/15-1/15
11. Karshiyev A.A., Mamatkulova U.E, Shobutayev Q.S. Implementation of a qualimetric approach in managing the quality of education of students of a modern university. European Journal of Research and Reflection in Educational Sciences Vol. 7 No. 12, 2019
12. Kim, N. Generalized indicator of qualimetry objects quality of various nature. Ukrainian Black Sea region agrarian science, 2021, Vol. 109, pp. 94-101.
13. Kozlov, V. Ie, & Kozlov, Yu. V. (2018). Metod vyrishennia zavdan pedahohichnoi kvalimetrii Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy — Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine, 2 (32), 34–39 с.
14. Hrinchenko, H., Trishch, R., Mykolaiko, V., Kovtun, O. Qualimetric approaches to assessing sustainable development indicators, E3S Web of Conferences, Aug. 2023, vol. 408, p. 01013, doi:10.1051/e3sconf/202340801013
15. N. I. Kim, A. M. Denisenko, A. R. Trishch, n.d. Кваліметричний підхід до оцінювання якості об’єктів різної природи статистичними методами. Системи управління, навігації та зв’язку, 2017, випуск 4(44).

16. Буданов П.Ф., Грінченко Г.С., Нечуйвітер О.П., Бойко Т.Г., Цихановська І.В. Застосування методів кваліметрії для оцінки комплексних показників якості багатопараметричних об'єктів. Машинобудування. 2022. №30. С. 73 -84. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84
17. Куць В. Р., Столярчук П. Г., Друзюк В. М. Кваліметрія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 256 с.
18. Опорний конспект лекцій «Кваліметрія» [Електронний ресурс] / Укладачі : Д. М. Одарченко, Є. Б. Соколова – Електрон. дані. – Х. : ХДУХТ, 2020. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Назва з тит. Екрана
19. Огірко, І.В., Ясінський, М.Ф., Ясінська-Дамрі, Л.М., Огірко, О.І., інформаційні технології кваліметрії. Комп'ютерні технології друкарства 2019/2 (42) с.89–99
20. Cherniak, O., Sorocolat, N., Fatieieva, L., Bahaiev, I., Trishch, Y., 2023. APPLICATION OF THE INTEGRATION METHOD TO OBTAIN A COMPLEX INDICATOR OF LABOR SAFETY. Вісник НТУ "ХПІ" 60–67. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.08
21. Головенко Т.М. Квалітологія виробів легкої промисловості: навчальний посібник / Т.М. Головенко, О.В. Пахолюк, Л.Г. Бартків, О.В. Шовкомуд. – Луцьк: ЛНТУ, 2023. – 245 с.
22. R. Trisch, E. Gorbenko, N. Dotsenko, N. Kim, A. Kiporenko. 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.2016.
23. Роїк М. В. Огляд програмних засобів статистичного аналізу даних [Електронний ресурс] / М. В. Роїк, О. І. Присяжнюк, В. О. Денисюк. – Режим доступу : http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5676
24. Лунячек В.Е., Нечуйвітер О.П., Рубан Н.П. Оцінювання сформованості компетентності у сфері охорони і захисту прав інтелектуальної власності у викладачів ЗВО засобами кваліметрії. «Проблеми інженерно-педагогічної освіти», № 68, 2020
25. Hanna Hrinchenko, Natalia Didenko, Valentyna Burbyga, Tetiana Lesina and Yana Medvedovska Ensuring sustainable education through the management of higher education quality indicators. E3S Web of Conf., 558 (2024) 01029. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801029
26. Trishch, R., Nechuiviter, O., Hrinchenko, H., Bubela, T., Riabchykov, M., Pandova, I. (2023) Assessment of safety risks using qualimetric methods. MM Science Journal. October 2023, 6668. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_10_2023021.
27. Trishch, R., et al. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. MM Science Journal, 2021, pp. 4769-4774.
28. Topchiyiv, O., et al. Methodological scheme of qualimetric assessment of recreational clusters. J. of Geology, Geography and Geoecology, 2023, Vol. 31, pp. 749-760
29. Guraliuk, A., Varava, I., Holovko, S., Shapenko, L., Oleshchenko, V. (2023). Expert Assessment of the Quality of Remote Educational Resources. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 13(1), pp. 34–44. https://doi.org/10.3991/ijep.v13i1.36121

Стаття надійшла для редакції 09.10.2024 Стаття рекомендована до друку 11.11.2024

[1]**HRINCHENKO H.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: hrinchenko@uipa.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6498-6142
[1]**MATSKO A.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: am.matsko@knmu.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0559-304X
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

INTEGRATION OF QUALIMETRIC APPROACHES INTO MODERN EDUCATIONAL INFORMATION MEASUREMENT TECHNOLOGIES

In the context of continuous information growth and rapid technological advancements, it is particularly crucial to have effective evaluation methods to ensure high accuracy and objectivity. Qualimetry, focusing on quantitative quality assessment methods, provides a systematic and scientifically grounded approach to analyzing the quality of educational processes and products. Using qualimetric methods in conjunction with modern information measurement technologies enables more precise and reliable assessments, critically important for effective management and improvement of educational systems.

The article explores the integration of qualimetric approaches into modern information measurement technologies. It discusses the potential applications of qualimetric methods to enhance the accuracy and objectivity of assessing the quality of educational processes and products. The basic principles of qualimetry and their technical implementation are described, including statistical methods, mathematical models, and specialized data collection, processing, and analysis software. The potential of these tools in modernizing educational systems, enhancing quality management efficiency, and creating conditions for continuous process improvement is analyzed. Examples of implementing qualimetric methods are provided to validate their effectiveness and potential.

Qualimetry is considered as the science of quantitative quality assessment, offering efficient tools for analyzing the quality of educational processes and products. The authors investigate the methods and approaches of qualimetry, their technical implementation, and integration into modern information measurement technologies. Integrating qualimetric approaches into information measurement technologies involves the application of statistical methods, mathematical models, and specialized software for data collection, processing, and analysis. This allows for obtaining objective and representative results that can be used for making well-founded managerial decisions. Thus, not only does it enhance the accuracy and objectivity of assessment, but it also creates prerequisites for continuous improvement of the quality of the educational process by identifying strengths and weaknesses, determining directions for improvement, and implementing innovations.

KEYWORDS: *qualimetric methods, assessment, quality, methodology, quality indicator, pedagogical evaluation, qualimetric assessment.*

In cites: Hrinchenko, H. S. & Matsko, A. M. (2024). Integration of qualimetric approaches into modern educational information measurement technologies. *Engineering*, (34), 39-50. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-04 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Motalo V.P., Motalo A.V., Stadnik B.I. Metrology, qualimetry and qualimetric measurements: theory and practice. Metrology, qualimetry and qualimetric measurements: theory and practice. Issue 76. 2015.
2. Lukina T.O. Qualimetry // Encyclopedia of Education / National Acad. of Pedagogical Sciences of Ukraine: 2nd ed., supplemented and revised. Kyiv: Yurinkom Inter, 2021. – p. 437-438.
3. Zadorozhna, R., Kepko, V. Methodology of the project management as a base of qualimetric analysis. Efektyvna ekonomika, No.8, 2021. doi: 10.32702/2307-2105-2021.8.93
4. Anufrieva O. L. Qualimetric approach to assessing the level of competitiveness of a higher education institution [Electronic resource] / O. L. Anufrieva // The 4th International scientific and practical conference "Dynamics of the development of world science" Perfect Publishing, Vancouver, Canada. – Vancouver, 2019. – Pp. 73–85. – Access mode: https://cutt.ly/pfZUcq2.

5. Borisenko K. B. Measuring the formation of professional competencies of future geography teachers by means of qualimetry / K. B. Borisenko // Problems of engineering and pedagogical education: collection of scientific works / Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy. – Kharkiv, 2018. – № 61. – p. 23-35.
6. Dmytrenko G. A., Anufrieva O. L., Burlayenko T. I., Medvid V. V. Qualimetry in management: humanistic context: tutorial. / by general editing G. A. Dmytrenko. Kyiv: Agrarian Education, 2016. 335 c.
7. Katrych O. O. Development of qualimetric methods for evaluating the processes of enterprise quality management systems in accordance with the requirements of international standards: dissertation of the candidate of technical sciences : 01.05.02 / O. O. Katrych ; Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy. – Kharkiv, 2015. – 163 c.
8. Katrych O. O., Trishch A. R., Denysenko A. M., Didenko N. V. Qualimetric tool for assessing the quality of processes of various nature. Mechanical engineering. 2015. № 16. C. 115-121.
9. Degtyareva G. A. Development of information and communication competence of teachers of philological disciplines in the system of postgraduate education: monograph / G. A. Degtyareva. – Kharkiv: Machulin, 2016. – 584 c.
10. Ginevicius, R., Trisc, R., Remeikiene, R., Zielinska, A., Strikaite-Latusinskaja, G. Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: Ginevičius, R., Trišč, R., Remeikienė, R., Zielińska, A., & StrikaitėLatušinskaja, G. (2022). Evaluation of the condition of social processes based on qualimetric methods: The COVID-19 case. Journal of International Studies, 15(1), 230-249. doi:10.14254/2071-8330.2022/15-1/15
11. Karshiyev A.A., Mamatkulova U.E, Shobutayev Q.S. Implementation of a qualimetric approach in managing the quality of education of students of a modern university. European Journal of Research and Reflection in Educational Sciences Vol. 7 No. 12, 2019
12. Kim, N. Generalized indicator of qualimetry objects quality of various nature. Ukrainian Black Sea region agrarian science, 2021, Vol. 109, pp. 94-101.
13. Kozlov, V. Ie, & Kozlov, Yu. V. (2018). Metod vyrishennia zavdan pedahohichnoi kvalimetrii Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy — Collection of scientific works of the National Academy of the National Guard of Ukraine, 2 (32), 34–39 c.
14. Hrinchenko, H., Trishch, R., Mykolaiko, V., Kovtun, O. Qualimetric approaches to assessing sustainable development indicators, E3S Web of Conferences, Aug. 2023, vol. 408, p. 01013, doi:10.1051/e3sconf/202340801013
15. N. I. Kim, A. M. Denisenko, A. R. Trishch, n.d. Qualimetric approach to assessing the quality of objects of various nature using statistical methods. Control, navigation and communication systems, 2017, Issue 4(44).
16. Budanov P.F., Grinchenko G.S., Nechuyviter O.P., Boyko T.G., Tsykhanovskaya I.V. Application of qualimetry methods for assessing complex quality indicators of multiparameter objects. Engineering. 2022. №30. C. 73 -84. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-73-84
17. Kuts V. R., Stolyarchuk P. G., Druzyuk V. M. Qualimetry. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. 256 c.
18. Reference lecture notes "Qualimetry" [Electronic resource] / Compiled by: D. M. Odarchenko, E. B. Sokolova – electronic data. – Х. : ХДУХТ, 2020. – 1 electronic optical disc (CD-ROM); 12 см. – Title screen name
19. Ogirko, I.V., Yasinsky, M.F., Yasinska-Damri, L.M., Ogirko, O.I., information technologies of qualimetry. Computer technologies of printing 2019/2 (42) c.89–99
20. Cherniak, O., Sorocolat, N., Fatieieva, L., Bahaiev, I., Trishch, Y., 2023. APPLICATION OF THE INTEGRATION METHOD TO OBTAIN A COMPLEX INDICATOR OF LABOR SAFETY. Вісник НТУ “ХПІ” 60–67. https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.08
21. Golovenko T.M. Qualitology of light industry products: a textbook / T.M. Golovenko, O.V. Pakholyuk, L.G. Bartkiv, O.V. Shovkomud. – Lutsk: LNTU, 2023. – 245 c.
22. R. Trisch, E. Gorbenko, N. Dotsenko, N. Kim, A. Kiporenko. 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.2016.
23. Roik M. V. Review of software tools for statistical data analysis [Electronic resource] / M. V. Roik, O. I. Prysiazhnyuk, V. O. Denysyuk. – Access mode: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5676
24. Lunyachek V.E., Nechuyviter O.P., Ruban N.P. Assessment of the formation of competence in the field of protection and defense of intellectual property rights among teachers of higher education institutions by means of qualimetry. "Problems of engineering and pedagogical education", № 68, 2020
25. Hanna Hrinchenko, Natalia Didenko, Valentyna Burbyga, Tetiana Lesina and Yana Medvedovska Ensuring sustainable education through the management of higher education quality indicators. E3S Web of Conf., 558 (2024) 01029. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455801029

26. Trishch, R., Nechuiviter, O., Hrinchenko, H., Bubela, T., Riabchykov, M., Pandova, I. (2023) Assessment of safety risks using qualimetric methods. MM Science Journal. October 2023, 6668. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_10_2023021.
27. Trishch, R., et al. Qualimetric method of assessing risks of low quality products. MM Science Journal, 2021, pp. 4769-4774.
28. Topchiyiv, O., et al. Methodological scheme of qualimetric assessment of recreational clusters. J. of Geology, Geography and Geoecology, 2023, Vol. 31, pp. 749-760
29. Guraliuk, A., Varava, I., Holovko, S., Shapenko, L., Oleshchenko, V. (2023). Expert Assessment of the Quality of Remote Educational Resources. International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP), 13(1), pp. 34–44. https://doi.org/10.3991/ijep.v13i1.36121

The article was received by the editors 10/09/2024
The article is recommended for printing 11/11/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-05
УДК (UDC): 658.62.018.012

[1]О. О. ОВЧАРОВ,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0764-4063
[1]К. А. КОТЕЛЕВЕЦЬ,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kyrylo.ktl@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8811-8848
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ПІДХОДИ ДО ЕФЕКТИВНОГО ІНЖЕНЕРНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБЄКТІВ

Анотація. В роботі розглядаються підходи до комплексного ефективного управління якістю енергетичних об'єктів на прикладі атомних електростанцій з метою забезпечення сталого функціонування. Запропоновано модель інженерного менеджменту яка включає елементи моніторингу та оцінювання технічного стану енергетичного обладнання, планування робіт з технічного обслуговування на результатах оцінювання, прогнозування порушення нормальних умов функціонування та на основі цих даних управління життєвим циклом енергообладнання та визначення якості та ефективності прийняття інженерних рішень. В основу моделі інженерного менеджменту покладено комплексний підхід, який охоплює всі етапи життєвого циклу обладнання. Якщо розглядати технічний стан та деградацію обладнання на прикладі турбогенераторів, як окремого чинника, що впливає на ефективну роботу об'єкта, то управління факторами пошкодження обладнання дає можливість підвищити як безпеку, так і ефективність експлуатації всієї енергосистеми.

КЛЮЧОВІ СЛОВА*: енергетичні об'єкти, безпека, інженерний менеджмент, технічна діагностика.*

Як цитувати: Овчаров О. О., Котелевець К. А. Підходи до ефективного інженерного управління якістю забезпечення безпеки енергетичних обєктів. *Машнобудування*. 2024. Вип. 34 С. 51-60. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-05

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

Забезпечення сталості функціонування енергетичних комплексів в сучасних реаліях є ключовою задачею, що включає вирішення ряд питань, як то технічну діагностику та модернізацію енергообладнання, забезпечення енергоефективності процесів, використання сталих ресурсів, що мають мінімальний негативний вплив для навколишнього середовища тощо. Розв`язання цих питань необхідно робити комплексно з урахуванням потреб суспільства та із застосуванням новітніх технологій і принципів енергетичного менеджменту [1-3]. Сталий розвиток атомної енергетики передбачає впровадження нових технологій та методів для покращення ефективності, безпеки та прийняття відповідних управлінських рішень. Здійснення ефективного енергетичного менеджменту для забезпечення безпеки функціонування енергетичних комплексів неможливо без урахування досвіду експлуатації, своєчасної технічної діагностики та прийняття науково обґрунтованих рішень [4-5], що зараз є актуальною задачею.

Завдання даного дослідження є розробка моделі ефективного інженерного менеджменту АЕС що базується на забезпеченні безпеки за рахунок послідовної реалізації концепції глибоко ешелонного захисту, заснованого на застосуванні системи технічних і організаційних заходів щодо запобігання аварійних ситуацій, з метою захисту

© Овчаров О. О., Котелевець К. А., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

персоналу, населення, навколишнього середовища задля стійкого розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для забезпечення надійності й стійкості енергосистеми України і її зв'язків з енергосистемами інших держав розробляються довгострокові та щорічні плани технічного переозброєння, що визначають об'єкти, види й обсяги інженерних робіт, строки їх реалізації, джерела фінансування заходів та є складовою загального інженерного менеджменту. Основною метою інженерного менеджменту на всіх етапах життєвого циклу АЕС є створення й підтримка комплексу конкретних мір і дій з безпеки, спрямованих на забезпечення нормальної експлуатації, на запобігання виникнення порушень нормальної експлуатації, аварійних ситуацій, аварій, на запобігання розвитку проєктних аварій у позапроєктні й обмеження наслідків позапроєктних аварій. Виходячи з концепції безпеки, нормами, правилами й стандартами по ядерній і радіаційній безпеці встановлюються принципи, критерії й вимоги безпеки, тобто такі значення параметрів, характеристик і умов, при виконанні яких забезпечується ядерна й радіаційна безпека АЕС [6-11]. Дотримання цих норм та критеріїв є основою інженерного менеджменту та потребує проведення робіт з діагностики технічного стану енергообладнання для виявлення можливих загроз, що можуть призвести до порушення умов експлуатації, а також своєчасного управління технічними параметрами для запобігання аварійних відмов [12,13].

Питаннями технічної діагностики енергообладнання займаються вчені з різних позицій та підходів, що охоплюють механіку, електротехніку, матеріалознавство, а також математичне моделювання процесів. Зокрема, в роботах [14-16] аналізуються зміни параметрів обладнання під час експлуатації, визначають можливі зони пошкоджень і прогнозують залишковий ресурс елементів таких як трубопровідні системи, головний циркуляційний насос тощо. Такий комплексний підхід дозволяє розробляти сучасні методи діагностики, які враховують як фізико-механічні особливості матеріалів, так і вплив зовнішніх факторів, таких як температура, вібрація, корозія тощо. В роботі [17] пропонуються підходи до підвищення якості автоматизації систем управління, що робить значний вклад в ефективність роботи енергообладнання та процеси деградації. В роботах [2, 4,13,18] пропонуються науково обґрунтовані технічні і конструктивні рішення по зменшенню впливу факторів, що негативно впливають на функціонування енергообладнання, як то застосування додаткових опор, фіксація елементів, зміна режимів експлуатації тощо. Це сприяє підвищенню надійності роботи енергетичних систем та зменшенню ризиків аварій, що особливо важливо в умовах сучасних викликів у сфері енергетики та сталого розвитку.

Разом з тим, важливим залишаються питання розробки загальної концепції технічної діагностики та ефективного управління процесами деградації енергообладнання з метою подальшого удосконалення методів та засобів з урахуванням сучасних науково-технічних рішень.

Виклад основного матеріалу.

Енергетичні комплекси та структурні підрозділи, що входять до них, належать до об'єктів підвищеної небезпеки і до них пред'являються особливі вимоги щодо забезпечення безпеки на всіх етапах життєвого циклу: проєктування, введення в експлуатацію, експлуатація в рамках проєктних термінів, зняття з експлуатації або ж роботи в надпроєктні терміни. Безпека роботи всього енергетичного комплексу залежить від правильно організованої роботи в цілому і надійної роботи окремих елементів системи [17-19]. Для забезпечення ефективного механізму інженерного менеджменту енергоблоку необхідно максимально оптимізувати процес його експлуатації, щоб забезпечити безпеку функціонування енергоблоку без

його зупинки на тривалий час і пов'язаних із цим економічних втрат, згідно з межами й умовами безпечної експлуатації енергоблоку АЕС. Для цього необхідна оцінка технічного стану й залишкового ресурсу обладнання, яка здійснюється в рамках робіт з контролю, оцінці, прогнозуванню й керуванню ресурсними характеристиками елементів енергоблоку і продовженню строку експлуатації блоку атомної станції.

Для врахування факторів, що діє на технічний стан обладнання пропонується модель інженерного менеджменту енергообладнання на атомних електростанціях (АЕС), яка включає комплексний підхід до управління експлуатацією, обслуговуванням та модернізацією обладнання для забезпечення безпеки, надійності та ефективності роботи (рис. 1). Ця модель спрямована на забезпечення високого рівня надійності обладнання АЕС, мінімізацію аварійних ситуацій, підвищення ефективності роботи та дотримання суворих вимог з безпеки.

Одним з ключових компонентів моделі інженерного менеджменту є дослідження стану енергообладнання за ключовими факторами, такими як вібрація, температура, тиск тощо, для забезпечення безпечної та якісної експлуатації. Зростаючі потреби в електроенергії та неможливість збільшення енергопотужності змушують до підвищення ефективності роботи діючих об'єктів енергетики. Основним фактором неефективного виробництва електроенергії на атомних електростанціях є пошкодження турбогенераторів (ТГ), що значно знижує вироблення електроенергії. Якщо розглядати цей фактор, як окремий чинник, то управління цим чинником дає змогу забезпечити ефективне енергокерування всією енергосистемою.

Рис.1- Модель інжинірингового управління енергетичним обладнанням
Fig. 1- Model of engineering management of power equipment

До факторів пошкодження, що впливають на стрижні обмотки статора турбогенератора, відносяться такі деградаційні фактори:

температурні режими під час експлуатації обладнання, включно з можливими циклічними коливаннями;

несприятливі вібродинамічні коливання на вузол «колектор дистиляту - патрубки - зовнішні трубопроводи» конструкції лобових частин обмотки статора;

вплив термомеханічних напружень, що виникають в обмотці статора під час багаторазових змін навантажувальних режимів;

вплив хімічно активних речовин;

механічні пошкодження під час проведення ремонтних і монтажних робіт.

Як правило, деградація протікає інтенсивніше за одночасного впливу на обладнання кількох факторів пошкодження, наприклад: наявність локальних перегрівів стрижнів обмотки статора, наявність механічних домішок у складі охолоджувального дистиляту, підвищені вібрації на виводах шин обмотки статора тощо. Для забезпечення безпеки функціонування енергообладнання необхідно розробити комплексний нормативний підхід до проведення робіт з технічної діагностики з урахуванням факторів, що впливають на деградаційні процеси та забезпечать ефективність та сталість подальшої експлуатації.

Діагностика стану стрижнів турбогенераторів на атомних електростанціях (АЕС) є критично важливою для забезпечення безпеки та ефективності їх експлуатації. Вона дозволяє своєчасно виявляти дефекти та оцінювати залишковий ресурс обладнання. Основні методи діагностики стрижнів турбогенераторів АЕС та їх переваги та недоліки представлено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Методи діагностики стрижнів турбогенераторів АЕС

Table 1

Diagnostic methods for NPP turbogenerator rods

Вид методу	Характер застосування	Переваги та недоліки
Електричні методи	**Метод вимірювання опору ізоляції**: дозволяє оцінити стан ізоляційних матеріалів обмоток. Погіршення ізоляції може призводити до коротких замикань.	**Переваги:** Простота та швидкість виконання. Дозволяє виявити деградацію ізоляції без демонтажу обладнання. **Недоліки:** Не забезпечує точного визначення місця пошкодження. Чутливий до зовнішніх факторів, таких як температура та вологість.
	Тангенс втрат діелектрика (tgδ): оцінює втрати енергії у вигляді тепла, що свідчить про старіння або пошкодження ізоляції	**Переваги:** Висока чутливість до змін стану ізоляції. Інформативність для оцінки старіння ізоляції. **Недоліки:** Не дає інформації про механічні дефекти провідників. Вимагає спеціалізованого обладнання.
	Імпульсна рефлектометрія: виявляє дефекти провідників і місцеві пошкодження ізоляції за допомогою аналізу відбитих імпульсів	**Переваги:** Можливість точного визначення місця пошкодження. Швидкий і ефективний аналіз. **Недоліки:** Складність у застосуванні на великих та розгалужених системах. Потребує досвіду для інтерпретації результатів.

Вид методу	Характер застосування	Переваги та недоліки
Магнітні методи	**Метод магнітної пам'яті металу (МПМ)**: виявляє напружено-деформований стан матеріалу стрижнів шляхом аналізу залишкових магнітних полів	**Переваги:** Неінвазивний метод, що не потребує демонтажу. Може використовуватися безпосередньо під час експлуатації обладнання. **Недоліки:** Потребує спеціального обладнання та кваліфікованих фахівців. Менш ефективний для немагнітних матеріалів.
	Магнітопорошковий контроль: використовується для виявлення поверхневих та близькоповерхневих тріщин у матеріалі	**Переваги:** Висока точність виявлення поверхневих дефектів. Відносна простота застосування. **Недоліки:** Застосовується лише для магнітних матеріалів. Потребує підготовки поверхні.
Вібраційна діагностика	Вібраційний аналіз дозволяє оцінити механічний стан стрижнів, виявити можливі зсуви, послаблення кріплень або асиметрії, що можуть впливати на роботу генератора.	**Переваги:** Виявляє як механічні, так і динамічні дефекти. Не потребує припинення роботи обладнання. **Недоліки:** Висока чутливість до шумів навколишнього середовища. Вимагає складного аналізу та спеціальних алгоритмів для інтерпретації.
Акустичні методи	**Акустична емісія**: виявляє активність дефектів у матеріалі, таких як тріщини, що розвиваються під навантаженням, шляхом реєстрації високочастотних хвиль.	**Переваги:** Дозволяє виявляти дефекти у реальному часі. Підходить для ранньої діагностики тріщин. **Недоліки:** Висока чутливість до сторонніх шумів. Вимагає спеціалізованого обладнання.
	Ультразвукова діагностика: використовується для виявлення внутрішніх дефектів, таких як пори, тріщини або включення.	**Переваги:** Точне виявлення внутрішніх дефектів. Застосовується для широкого спектра матеріалів. **Недоліки:** Залежить від якості контакту з поверхнею. Висока вартість обладнання.
Тепловізійний контроль	Використовується для виявлення аномальних зон нагрівання внаслідок дефектів ізоляції, надмірного тертя або зношування.	**Переваги:** Неінвазивність і можливість виконання діагностики під час роботи обладнання. **Швидке виявлення зон перегріву.** **Недоліки:** Обмеження у виявленні дефектів всередині матеріалу. Залежність від умов освітлення та температури навколишнього середовища.

Вид методу	Характер застосування	Переваги та недоліки
Методи оцінки залишкового ресурсу	**Циклічні випробування під навантаженням**: дозволяють оцінити, як стрижні реагують на екстремальні умови роботи.	**Переваги:** Відображає реальну поведінку обладнання під навантаженням. Дозволяє прогнозувати залишковий ресурс. **Недоліки:** Трудомісткість і висока вартість. Не завжди можливе виконання під час експлуатації.
	Моделювання деградації: аналіз змін характеристик матеріалу під впливом тривалих експлуатаційних факторів, таких як тепловий, механічний і радіаційний впливи	**Переваги:** Дозволяє оцінити вплив довгострокових експлуатаційних факторів. Може бути виконане за допомогою програмного забезпечення. **Недоліки:** Залежить від точності вхідних даних. Може вимагати значних обчислювальних ресурсів.
Візуальний та ендоскопічний контроль	Виявляє механічні пошкодження, корозію або інші видимі дефекти на поверхні стрижнів або в важкодоступних місцях.	**Переваги:** Простота виконання. Можливість виявлення очевидних дефектів, таких як корозія чи механічні пошкодження. **Недоліки:** Обмеженість виявлення прихованих дефектів. Залежить від кваліфікації фахівця.

Використання комбінації цих методів дозволяє отримати комплексну інформацію про стан стрижнів турбогенератора, виявити потенційні проблеми та розробити заходи для їх усунення, що є ключовим фактором у забезпеченні безперебійної роботи турбогенераторів на АЕС.

Отже, на першому етапі моделі інжинірингового менеджменту необхідно визначити фактори, що впливають на технічний стан енергетичного обладнання та методи технічної діагностики енергообладнання та подальшого моніторингу. Як було показано, що комбінація факторів впливу може синергетично впливати на загальний стан, разом з тим і комбінація методів контролю підвищує точність оцінки. Отже, необхідно розробити алгоритм застосування тих чи інших методів контролю з урахуванням систематизації факторів впливу (Рис. 2).

Запропонована систематизація дає можливість включити в модель інженерного менеджменту алгоритм обрання методу технічної діагностики виходячи з визначення факторів що мають найбільший вплив на енергоефективну роботу обладнання. Разом з тим, систематизація виявляє слабкі місця діагностики та є підставою до удосконалення підходів та розробки відповідного нормативного забезпечення на основі обробки статистичних даних по характерним факторам деградації стрижнів турбогенератора.

Виходячи з представленої систематизації, також важливим етапом моделі інженерного менеджменту є планування робіт з технічної діагности виходячи з імовірнісних сценаріїв розвитку подій (процесів деградації, старіння тощо). Врахування ризиків на основі прогнозування розвитку подій дає можливість визначити періоди контролю технічного стану енергообладнання, шляхом класифікації їх за рівнем ризику та відповідно впровадження корегувальних заходів (зміни режимів навантаження, зменшення впливу факторів, зміни хімічного складу носіїв, модернізація обладнання тощо).

Висновки

Запропонований підхід інженерного менеджменту дає можливість реалізувати алгоритм прогнозування подальшої безпечної експлуатації шляхом аналізу отриманих даних в режимі реального часу для найбільш небезпечних чи відповідальних ділянок обладнання, що дозволяє виявляти ознаки потенційних несправностей і забезпечувати своєчасне технічне подальше обслуговування та передбачити відмови або класифікувати обладнання за рівнем ризику. Застосовуючи методи імовірнісної оцінки безпеки дозволяє аналізувати різні параметри роботи обладнання, підвищуючи точність прогнозів за допомогою багатьох моделей.

Такий підхід, інтегрований з даними в режимі реального часу, суттєво підвищить ефективність управління енергетичними системами і дозволить не лише швидко діагностувати поточні проблеми, але й прогнозувати майбутні збої, створюючи можливість запобіжного обслуговування та оптимізації графіків технічної підтримки.

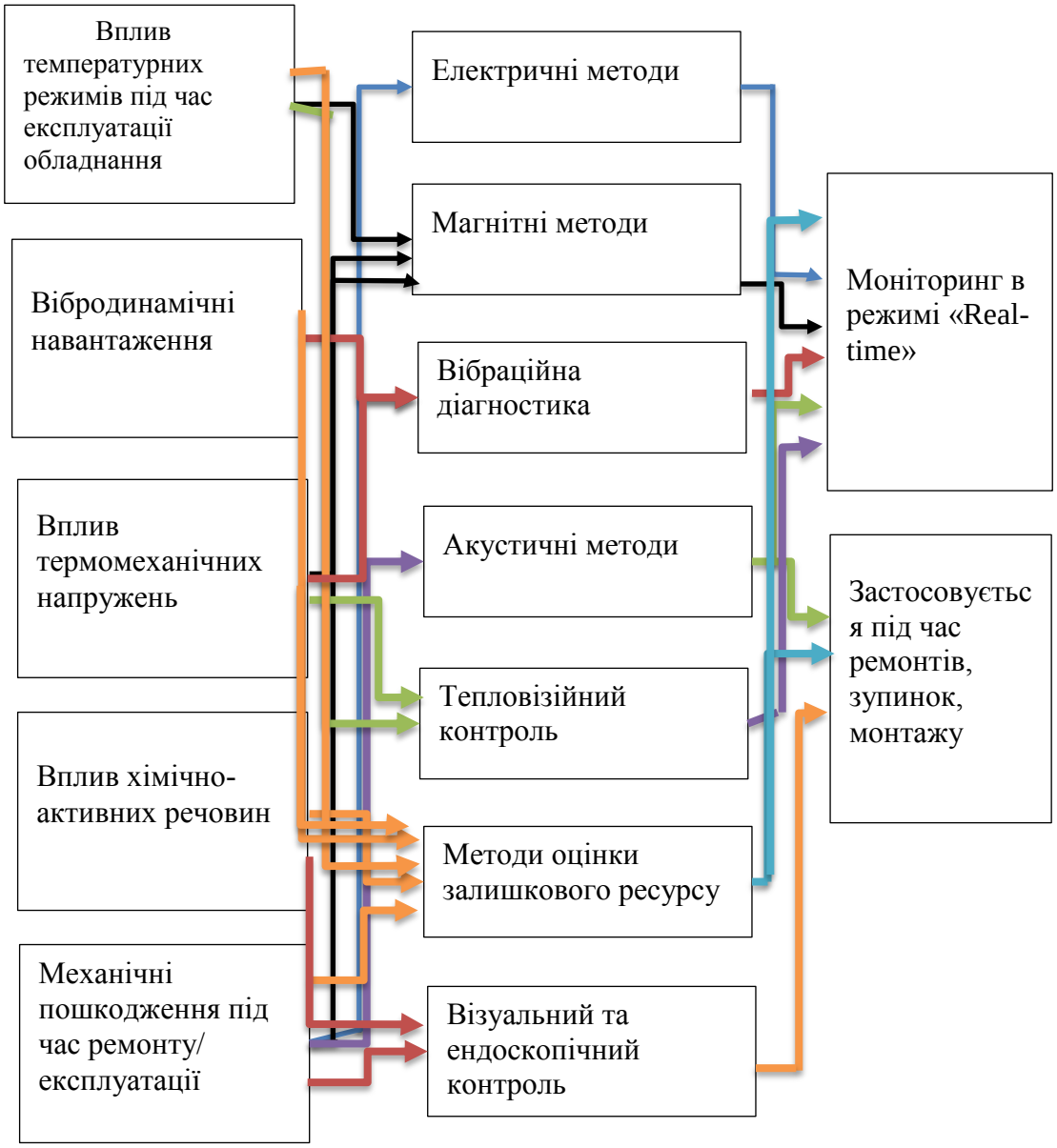


Рис. 2- Систематизація методів технічної діагностики стрижнів турбогенератора
Fig. 2- Systematization of methods for technical diagnostics of turbogenerator rods

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Sustainable Energy Safety Management Utilizing an Industry-Relative Assessment of Enterprise Equipment Technical Condition / Hrinchenko H., Prokopenko O., Shmygol N., Koval V., Filipishyna L., Palii S., Cioca L.-I. // Sustainability. – 2024. – No 16. – P. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/su16020771
2. An Approach to Ensure Operational Safety for Renewable Energy Equipment / Hrinchenko H., Kupriyanov O., Khomenko V., Khomenko S., Kniazieva V. // Circular Economy for Renewable Energy / eds Koval, V., Olczak, P. ; Green Energy and Technology. Springer, Cham. – 2023. – P. 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
3. Approaches to Sustainable Energy Management in Ensuring Safety of Power Equipment Operation / Hrinchenko H., Koval V., Shmygol N., Sydorov O., Tsimoshynska O., Matuszewska D. // Energies. – 2023. – Vol. 16. – P. 6488. DOI: https://doi.org/10.3390/en16186488
4. Забезпечення експлуатаційної безпеки АЕС у понадпроектний термін в контексті переходу до циркулярної економіки: Європейський Зелений Курс / Г. С. Грінченко та інші // Машинобудування : зб. наук. праць / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 30. – С. 61-72. DOI: 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72
5. Методологічні підходи для оцінювання якості багатопараметричних об'єктів енергетики / П. Ф. Буданов та інші // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1 (15). – С. 27–35. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04
6. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність" : Розпорядження Каб. М-в України від 08.08.2017 р. № 605. – Режим доступу : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#n8 (дата звернення 04. 10. 2024)
7. Комплаєнс-політика ДП «НАЕК «Енергоатом» ПЛ-С.014.150-21 від 13.07.2021 р. – Режим доступу : https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/compliance-policy/compliance-policy.pdf (дата звернення 04. 10. 2024)
8. Ageing Management for Research Reactors // Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series. – 2023. – No. SSG-10. (Rev. 1). – 55 p.
9. Ageing Management for Nuclear Power Plants // Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series. – 2009. – No. NS-G-2.12. – 48 p.
10. Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants // Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series. – 2018. – No. SSG-48. – 65 p.
11. Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants // Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series. – 2013. – No. SSG-25. – 106 p.
12. Уніфікація методів технічної діагностики трубопровідних систем з метою забезпечення безпечної експлуатації / Г. С. Грінченко та інші // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – 2022. – Вип. 29. – С. 62-69. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-62-69.
13. Algorithm of technical diagnostics of the complicated damage to the continued resource of the circulation pipeline of the nuclear power plant / H. Hrinchenko, R. Trisch, V. Burdeina, S. Chelysheva // Problems of Atomic Science and Technology. Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. – 2019. – № 2 (120). – P. 104–110. DOI: https://doi.org/10.46813/2019-120-104.
14. 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.
15. 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.
16. Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management / Hrinchenko, H., Udovychenko, V., Generalov, O., Parfentieva, O., Neskhodovskyi, I., Kopacz, M. // Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. – 2024. – Vol. 27(3). – P. 109-132. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/190811
17. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників / Г. Грінченко та інші // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – 2023. – Вип. 31. – С. 71-79. DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
18. Assessment of Power Equipment Operational Safety in the Sustainable Management of Residual Lifespan / Hrinchenko H., Antonenko N., Khomenko V., Artiukh S. // Economics Ecology Socium. – 2024. – № 8. – Pp. 78-91. DOI: https://doi.org/10.61954/2616-7107/2024.8.3-7
19. Compliance Management Implementation in Energy Sector Enterprises of the National Economy / Koval V., Hrinchenko H., Fomenko A., Didenko N., Medvedovska Y. // Renewables in the Circular Economy and Business / eds. V. Koval ; SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. – 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6

Стаття надійшла для редакції 07. 10. 2024 Стаття рекомендована до друку12.11.2024

[1]OVCHAROV O.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: ovcharovoleksandr1@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0002-0764-4063
[1]KOTELEVETS K.,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: kyrylo.ktl@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8811-8848
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

APPROACHES TO EFFECTIVE ENGINEERING QUALITY MANAGEMENT OF SAFETY ASSURANCE OF ENERGY FACILITIES.

Abstract. The paper considers approaches to integrated effective quality management of power facilities, such as nuclear power plants, to ensure sustainable operation. The paper proposes an engineering management model that includes elements of monitoring and assessment of the technical condition of power equipment, planning of maintenance works based on the assessment results, forecasting of violations of normal operating conditions, and, based on these data, management of the life cycle of power equipment and determination of the quality and efficiency of engineering decision-making. The engineering management model is based on an integrated approach that covers all stages of the equipment life cycle. If we consider the technical condition and degradation of equipment in the example of turbine generators as a separate factor affecting the efficient operation of the facility, then the management of equipment damage factors makes it possible to improve the safety and efficiency of the entire power system.

KEYWORDS*: power facilities, safety, engineering management, technical diagnostics.*

In cites: Ovcharov, O. & Kotelevets, K. (2024). Approaches to effective engineering quality management of safety assurance of energy facilities. *Engineering*, (34), 51-60. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-05 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Hrinchenko, H, Prokopenko, O, Shmygol, N, Koval, V, Filipishyna, L, Palii, S & Cioca, L.-I 2024, 'Sustainable Energy Safety Management Utilizing an Industry-Relative Assessment of Enterprise Equipment Technical Condition', *Sustainability*, No 16, Pp. 771. DOI: https://doi.org/10.3390/su16020771
2. Hrinchenko, H, Kupriyanov, O, Khomenko, V, Khomenko, S & Kniazieva, V 2023, 'An Approach to Ensure Operational Safety for Renewable Energy Equipment', In: Koval, V., Olczak, P. (eds) *Circular Economy for Renewable Energy. Green Energy and Technology. Springer*, Cham, Pp. 1-17. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30800-0_1
3. Hrinchenko, H, Koval, V, Shmygol, N, Sydorov, O, Tsimoshynska, O & Matuszewska, D 2023, 'Approaches to Sustainable Energy Management in Ensuring Safety of Power Equipment Operation', *Energies*, No 16, P. 6488. DOI: https://doi.org/10.3390/en16186488
4. Hrinchenko, HS, Kovtun, OA, Mykolaiko, VV, Nesterenko, RO & Antonenko, NS 2022, [Ensuring Operational Safety of NPPs beyond the Design Life in the Context of Transition to a Circular Economy: The European Green Deal], *Mashynobuduvannia*, № 30, Pp. 61-72. DOI 10.32820/2079-1747-2022-30-61-72
5. Budanov, PF, Hrinchenko, HS, Nechuiviter, OP & Tsykhanovska, IV 2023, [Methodological Approaches For Assessing The Quality Of Multi-Parameter Energy Facilities], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*, № 1 (15), Pp. 27–35. DOI: https://doi.org/10.20998/2413-4295.2023.01.04
6. Kabinet Ministriv Ukrainy 2017, *Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist", Rozporiadzhennia vid 08.08.2017 №605* [Safety, energy efficiency, competitiveness", Order of 08.08.2017 No. 605], viewed October 4, 2024 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#n8>
7. NAEK «Enerhoatom» 2021, *Komplaiens-polityka DP «NAEK «Enerhoatom» PL-S.014.150-21 vid 13.07.2021 r.* [*Komplaiens-polityka DP «* NNEGC «Energoatom.*» PL-S.014.150-21 vid 13.07.2021 r.*],

viewed October 4, 2024 <https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/compliance-policy/compliance-policy.pdf>
8. 2023, 'Ageing Management for Research Reactors', *Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series*, No. SSG-10. (Rev. 1), 55 p.
9. 2009, 'Ageing Management for Nuclear Power Plants', *Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series*, No. NS-G-2.12, 48 p.
10. 2018, 'Ageing Management and Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants', *Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series*, No. SSG-48, 65 p.
11. 2013, 'Periodic Safety Review for Nuclear Power Plants', *Specific Safety Guide. IAEA Safety Standards Series*, No. SSG-25, 106 p.
12. Hrinchenko, HS, Artiukh, SM, Hrinchenko, VV & Nehodov, SS 2022, [Unification of methods for technical diagnostics of pipeline systems with methods for ensuring safe operation], Engineering,. № 29, Pp. 62-69. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-62-69.
13. Hrinchenko, H, Trisch, R, Burdeina, V & Chelysheva S 2019, *Problems of Atomic Science and Technology*. *Section : Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, № 2, Pp. 104–110. DOI: https://doi.org/10.46813/2019-120-104.
14. Kiporenko, HS, Pakhalovych, MYe & Khoroshylov, OM 2016, [Assessment of the technical condition of NPP pipeline systems for compliance with regulatory parameters.], *Systemy upravlinnya, navihatsii ta zviazku*, iss. 4, pp. 146-152.
15. Kiporenko, HS & Pakhalovych, MYe 2016, [Improving the methodology for calculating the resistance to brittle fracture of pipelines of the South Ukrainian NPP.], *Systemy obrobky informatsii*, iss. 7, pp. 181-184.
16. Hrinchenko, H, Udovychenko, V, Generalov, O, Parfentieva, O, Neskhodovskyi, I & Kopacz, M 2024, 'Sustainability assurance optimization-based approach to energy infrastructure diagnostics in energy systems management', *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, iss 27(3), Pp. 109-132. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/190811
17. Hrinchenko, H, Vasylets, T, Kupriianov, O, Bliznychenko, O & Fursova, T 2023, [Improving the quality of ASC of thermal power plants by specifying the optimality criteria for technical and economic indicators.], Engineering, iss. 31. DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
18. Hrinchenko, H, Antonenko, N, Khomenko, V & Artiukh, S 2024, 'Assessment of Power Equipment Operational Safety in the Sustainable Management of Residual Lifespan', *Economics Ecology Socium*, iss 8, Pp. 78-91. DOI: https://doi.org/10.61954/2616-7107/2024.8.3-7
19. Koval, V, Hrinchenko, H, Fomenko, A, Didenko, N & Medvedovska, Y 2025, 'Compliance Management Implementation in Energy Sector Enterprises of the National Economy', In: Koval, V. (eds) *Renewables in the Circular Economy and Business*. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer*, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-72174-8_6

The article was received by the editors 10/07/2024
The article is recommended for printing 11/12/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-06
УДК 621.311.22

[1]**Г.І. КАНЮК,** доктор технічних наук
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**А. Ю. МЕЗЕРЯ,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1]**Т.М. ФУРСОВА,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1900-7432
[1]**Д.О. ЧИРОЧКІН,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:chirochkin123@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9029-0471
[1]**О.М. ЄПІК,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:oleksandrepik0@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4909-6431
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ (ТЕПЛОВОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ) ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

У статті проведено аналіз показників якості роботи теплових і атомних електростанцій, а саме теплової економічності та визначено основні шляхи їх підвищення. Показано, що регенеративний підігрів живильної води застосовується на усіх паротурбінних установках та істотно підвищує теплову і загальну економічність установок. Чим вищі параметри пари перед турбіною, тим більший інтервал температур, на який може бути здійснений підігрів конденсату, і більший ефект від застосування схеми з регенеративним підігрівом. Визначено, що регенеративний підігрів живильної води в циклі з перегрітою парою також підвищує коефіцієнт корисної дії (ККД), проте термічний ККД регенеративного циклу перегрітої пари завжди нижче ККД циклу Карно при одних і тих же початкових і кінцевих температурах. Доведено, що при одній і тій же температурі живильної води, чим менше недогрівання, тим більше робота потоку пари відбору і тим вищою є теплова економічність установки, а найбільший ефект від регенерації буде при застосуванні підігрівачів змішувального типу. Показано, що для турбін з протитиском регенеративний підігрів підвищує економічність установки тільки тоді, коли він здійснюється додатковою витратою пари, понад необхідну для потреб виробництва. У турбінах з регульованими відборами регенеративні відбори, розташовані після промислового, в розрахунку на одну і ту ж кількість пари, що відбирається, мають більший вплив на ККД і тому іноді застосування регенеративного підігріву живильної води може призвести до збільшення ККД навіть при деякому зменшенні витрати пари споживачеві. Виконано систематизацію та аналіз наявних методів оцінки теплової економічності електростанцій різних типів, показано вплив витрат енергії на власні потреби на значення ККД електростанцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *показники якості, енергозбереження, економічність, електростанція.*

Як цитувати: Канюк Г.І., Мезеря А. Ю., Фурсова Т.М., Чирочкін Д.О., Єпік О.М. Шляхи підвищення показників якості (теплової економічності) електростанцій. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 61-71. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-06

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

Зараз очевиднішим стає факт взаємозв'язку енергозбереження, що забезпечує зниження витрати палива та енергії на одиницю продукції, що

© Канюк Г.І., Мезеря А. Ю., Фурсова Т.М., Чирочкін Д.О., Єпік О.М., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

виробляється, з глобальною проблемою екології планети. Згідно з дослідженнями, які проводились ведучими країнами Світу, потенціал енергозбереження становить близько 1/3 всього обсягу споживаних первинних ресурсів.

Витрата первинних енергоресурсів у розрахунку на одиницю валового внутрішнього продукту в нашій країні приблизно в 1,3 раза більша ніж у США, і у 2 рази вище порівняно з передовими західноєвропейськими країнами та Японією.

Серед основних причин неблагополучного становища в галузі енергоємності економіки слід назвати практично повну відсутність державної політики у цій найважливішій галузі. Наслідком цього є майже повна відсутність принципів раціонального використання та економічного витрачання палива та енергії як при виробництві енергії, так й при її споживанні.

Особливо це стало відчутніше за зміни системи управління енергетикою та формами власності, за високого ступеня зносу основного та допоміжного обладнання ТЕС та АЕС.

Проблеми енергозбереження залишаються і будуть у 21 столітті у центрі уваги світової громадськості. Вирішенню цієї проблеми присвячено Основні положення енергетичної стратегії України на період до 2035 року [1]. Ця проблема призводить, зокрема, до необхідності аналізу показників теплової ефективності електростанцій та пошуку шляхів їх підвищення [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У напрямку енергозбереження при генерації електричної та теплової енергії на електричних станціях ведуться і інтенсивно розвиватимуться дослідницькі, конструкторські та монтажні роботи з підвищення економічності наявних ТЕС та АЕС, оскільки більша частина основного та допоміжного обладнання енергоблоків 200 та 300 МВт виробило свій ресурс (фізично та морально застаріло), то з метою безпеки параметри пари та води в них знижено. Це призвело до зниження їх ККД на 4 і більше відсотків.

Особа увага приділяється питанням автоматизації технологічних процесів електростанцій, як одним з основних шляхів підвищення енергоефективності та надійності [3, 4]. Проводиться оптимізація показників якості систем керування [5], та впровадження прецизійних систем керування [6]. Серед технологічних процесів в напрямку підвищення ефективності роботи електростанцій, приділяється системам низькопотенційних комплексів [7], обладнання котельних установок [8] та узагальнення рішень з метою підвищення енергоефективності [9]. Розглядаються питання автоматизації розрахунку теплової ефективності ефектростанцій [10] та подовження ресурсу теплоенергетичного обладнання [11].

Незважаючи на це, потенціал енергозбереження не вичерпано. Його треба шукати й надалі для підвищення показників якості, оптимізації теплових режимів роботи обладнання електростанцій та в удосконаленні систем керування з метою гарантованої підтримки цих режимів.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз показників теплової економічності електростанцій та визначення шляхів їх підвищення, що дасть змогу знизити собівартість вироблення енергії та підвищити конкурентоспроможність вітчизняних виробників.

Виклад основного матеріалу

1.Аналіз показників теплової економічності електростанцій

Теплова економічність КЕС характеризується значеннями ККД, питомої витрати тепла та питомої витрати умовного палива (для АЕС – значенням питомої витрати ядерного палива). При цьому на

звичайних ТЕС питома витрата умовного палива є основним показником).

Повні ККД електростанцій можуть бути визначені таким способом [11].

Для електростанцій, що працюють на органічному паливі:

$$\eta_{\text{ст}} = \eta_{\text{е}} \eta_{\text{тр}} \eta_{\text{пк}} \quad (1)$$

Для двоконтурної АЕС:

$$\eta_{\text{ст}} = \eta_{\text{е}} \eta''_{\text{тр}} \eta_{\text{пг}} \eta''_{\text{тр}} \eta_{\text{ру}} . \quad (2)$$

Тут:

- абсолютний електричний ККД турбогенераторної установки:

$$\eta_{\text{е}} = \eta_t \eta_{oi} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} = \eta_i \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} = \eta_t \eta_{0\text{е}} ; \quad (3)$$

- термічний ККД турбінної установки:

$$\eta_t = \left(q_0 - q_{\text{к}}\right) / q_0 , \quad (4)$$

де q_0 і $q_{\text{к}}$ – кількість теплоти, підведена до 1 кг пара в котлі або реакторі і відведене від нього в конденсаторі відповідно (для найпростішої установки, що працює за ідеальним циклом Ренкіна):

$$\eta_t = \frac{\left(i_0 - i_{\text{ж.в}}\right) - \left(i^{\text{н}}_{\text{к},a} - i_{\text{к}}\right)}{i_0 - i_{\text{ж.в}}} = \frac{\left(i_0 - i^{\text{н}}_{\text{к},a}\right) - \left(i_{\text{ж.в}} - i_{\text{к}}\right)}{i_0 - i_{\text{ж.в}}} = \left(н_a - н_{a,\text{н}}\right) / q_0 \quad (5)$$

де $i_{\text{к}}, i_{\text{ж.в}}$ – ентальпія води на виході з конденсатора та після насоса відповідно; $i_0, i^{\text{н}}_{\text{к},a}$ – ентальпія пари перед турбіною та на вході в конденсатор при адіабатичному розширенні в турбіні);

- наявний (адіабатичний) перепад ентальпій:

$$н_a = i_0 - i_{\text{к},a} ;$$

- витрати енергії в насосі, віднесені до 1 кг. води при її адіабатичному стисканні:

$$н_{a,\text{н}} = i_{\text{ж.в}} - i_{\text{к}} ;$$

-внутрішній відносний ККД турбіни:

$$\eta_{0i} = \frac{н_i}{н_a} = \frac{L_i}{L_a} , \quad (6)$$

де $н_i$ і L_i – використаний перепад ентальпії та внутрішня питома робота пари у турбіні;

(зазвичай $\eta_{0i} = 0,80 - 0,90$, а для сучасних потужних турбін при номінальному навантаженні $\eta_{0i} = 0,85 - 0,90$);

- внутрішній абсолютний ККД турбіни, що характеризує частку тепла, перетвореного на роботу в реальній паротурбінній установці:

$$\eta_i = L_i / q_0 = \eta_t \eta_{0i} ; \quad (7)$$

$\eta_{\text{м}}$ – механічний ККД турбіни (для сучасних турбін $\eta_{\text{м}} = 0,97 - 0,99$); $\eta_{\text{г}}$ – ККД генератора (при повітряному охолодженні $\eta_{\text{г}} = 0,97 - 0,98$);

- відношення електричної енергії, що виробляється 1 кг пара до роботи L_a, що здійснюється при адіабатичному розширенні цієї пари:

$$\eta_{0\text{е}} = \eta_{0i} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{г}} ; \quad (8)$$

$\eta_{тр}$ – ККД трубопроводів, що враховує гідравлічні та теплові втрати у трубопроводах (для ТЕС та двоконтурних АЕС $\eta_{\text{тр}} = 0,97 - 0,98$); $\eta_{\text{пк}}$ – ККД парового котла (зазвичай лежить в межах 0,90-0,93); $\eta_{\text{пг}}$ – ККД парогенераторів АЕС, що враховує втрати тепла в навколишнє середовище (зазвичай не перевищують 1%) та втрати з водою продування:

$$Q_{\text{пр}} = D_{\text{о.пр}} (i_{\text{о.пр}} - i_{\text{с.в}}) , \quad (9)$$

де $D_{\text{о.пр}}$ – кількість продувної води, що надходить з охолоджувача продування; $i_{\text{о.пр}}$ – ентальпія води після охолоджувача продування; $i_{\text{с.в.}}$ – ентальпія сирої води; $\eta_{\text{ру}}$ – ККД реакторної установки, що враховує втрати тепла у навколишнє середовище, втрати з водою продування реактора, втрати пов'язані з охолодженням біологічного захисту, втрати у сповільнювачі та у деяких інших елементах установки (ККД реакторних установок типу ВВЕР становить 0,32-0,33) [2].

Абсолютний електричний ККД конденсаційної турбогенераторної установки може бути визначений також із співвідношення електричної потужності установки N_e та кількість теплоти Q_0, підведеного з парою до турбогенератора в одиницю часу:

$$\eta_{\text{е}} = N_{\text{е}} / Q_0 , \quad (10)$$

а ККД станції – з аналогічного співвідношення:

$$\eta_{\text{ст}} = N_{\text{е}} / Q_{\text{ст}} . \quad (11)$$

У цих залежностях:

$$Q_0 = D_0 \left(i_0 - i_{\text{ж.в}}\right) ; \quad (12)$$

$$Q_{\text{ст}} = Q_0 / \eta_{\text{втр}} , \quad (13)$$

де $\eta_{втр}$ – коефіцієнт, що оцінює всі втрати, починаючи від парового котла ТЕС або реактора АЕС до турбіни.

Для установок на органічному паливі:

$$\eta_{втр} = \eta_{пк}\eta_{тр}; \quad (14)$$

для двоконтурної АЕС:

$$\eta_{втр} = \eta_{ру}\eta'_{тр}\eta_{пг}\eta''_{тр}, \quad (15)$$

де $\eta'_{тр}$ і $\eta''_{тр}$ – ККД трубопроводів першого та другого контурів.

Значення $\eta_е$ (3), (10) та $\eta_{ст}$ (1),(11) не враховують витрати електроенергії на потреби електростанції, і тому розглядаються як ККД брутто.

Якщо потужність механізмів власних потреб становить $\Delta N_{в.п.}$, то ККД електростанції $\eta^{н}_{ст}$ з урахуванням енергії, витраченої на власні потреби (ККД електростанції нетто) визначається як:

$$\eta^{н}_{ст} = \left(N_е - \Delta N_{в.п.}\right)/Q_{ст}, \quad (16)$$

або

$$\eta^{н}_{ст} = \eta_{ст}\left(1-\beta_{в.п.}\right), \quad (17)$$

де частка потужності, що витрачається на власні потреби станції:

$$\beta_{в.п.} = \Delta N_{в.п.}/N_е. \quad (18)$$

ККД нетто електростанції може бути також визначений залежно від:

$$\eta^{н}_{ст} = \eta_{ст}\eta_{в.п.}, \quad (19)$$

де ККД власних потреб електростанції:

$$\eta_{в.п.} = N^{н}_е/N_е, \quad (20)$$

або

$$\eta_{в.п.} = 1-\beta_{в.п.}. \quad (21)$$

2. Оцінка теплової економічності

Оцінка теплової економічності установки проводиться також за питомою витратою тепла. У розрахунках зазвичай розглядають питому витрату тепла на турбогенераторну установку $q_е$ та питома витрата тепла по всій електростанції $q_{ст}$. Ці величини визначаються з виразів [11]:

$$q_е = 3600Q_0/N_е; \quad (22)$$

$$q_{ст} = 3600Q_{ст}/N_е. \quad (23)$$

Тут $q_е$ і $q_{ст}$ виражаються у кДж на 1 кВт·год.

З урахуванням (10) та (11) отримаємо:

$$q_е = 3600 \quad /\eta_е; \quad (24)$$

$$q_{ст} = 3600 \quad /\eta_{ст}. \quad (25)$$

Питома витрата умовного палива для електростанцій на органічному паливі може бути визначена з рівняння теплового балансу електростанції:

$$BQ^{н}_р = 3600N_е/\eta_{ст}, \quad (26)$$

де B – загальна годинна витрата палива, кг/год; $Q^{н}_р$ – нижча питома теплота згоряння палива, кДж/кг.

Питома витрата палива при цьому:

$$b = B/N_е = 3600/Q^{н}_р\eta_{ст}, \quad (27)$$

а для умовного палива (з нижчою теплотою згоряння $Q^{н}_р = 29300$ кДж/кг):

$$b_у = 3600/29300\eta_{ст} \approx 0.123/\eta_{ст}$$

,кг/кДж (28)

Витрата ядерного палива на АЕС є тим самим показником теплової економічності, як і витрата умовного палива, т.к. при розподілі всіх ядер 1 кг урану завжди виділяється одне і те ж кількість тепла – 7,9 · 10^{10} кДж.

Зазвичай вважають витрату палива, що вигоріло, в середньому на 15% більше ізотопів, що розділилися. Тоді кількість тепла, що виділяється в розрахунку на 1 кг. вигорілого ядерного палива може бути прийнято рівним:

$$Q_{я.п.} = 0,85 \cdot 7,9 \cdot 10^{10} = 6,7 \cdot 10^{10} \text{ кДж/кг}$$

$$Q_{я.п.} = \frac{6,7 \cdot 10^{10}}{3600} = 1,86 \cdot 10^{7} \text{ кВт} \cdot \text{год/кг}$$

Відповідно до залежності (1.27), питома витрата ядерного палива, що вигоріло:

$$b_{я.п.} = \frac{3600}{Q_{я.п}\eta_{ст}} = \frac{3600}{6,7 \cdot 10^{10}\eta_{ст}} = \frac{5,4 \cdot 10^{-8}}{\eta_{ст}}, \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}, \quad (29)$$

або

$$b_{\text{я.п.}} = \frac{0{,}054}{\eta_{\text{ст}}}, \quad \frac{\text{г}}{\text{МВт} \cdot \text{год}}. \qquad (30)$$

Визначення питомих витрат тепла і палива по електростанціях з урахуванням витрат енергії на власні потреби здійснюється за залежностями (22)-(30), проте при цьому в розрахункові формули вводяться значення $N_{\text{e}}^{\text{н}}$ і $\eta_{\text{ст}}^{\text{н}}$ (19)-(20).

Загальна витрата палива на АЕС, як відомо, значно перевищує кількість палива, що вигоріло.

Загальна витрата ядерного палива може бути визначена залежно від глибини вигоряння *a* (у кілограмах вигорілої речовини, що ділиться на 1т палива) (т/рік):

$$B_{\text{я.п.}} = \frac{N_{\text{e}} \cdot \tau}{1{,}86 \cdot 10^7 \eta_{\text{ст}} \cdot a}, \qquad (31)$$

або

$$B_{\text{я.п.}} = \frac{b_{\text{я.п.}} N_{\text{e}} \cdot \tau}{a}, \qquad (32)$$

де τ – число годин використання встановленої потужності на рік.

Часто сумарне вигоряння палива виражають у МВт·доб на 1 т. урану. В цьому випадку залежність загальної витрати палива від потужності електростанції (у мегаватах) визначається виразом (г/рік):

$$B_{\text{я.п.}} = \frac{N_{\text{e}} \cdot \tau}{24 K \, \eta_{\text{ст}}}. \qquad (33)$$

При прийнятих припущеннях вигоряння 1 кг 235*U* обумовлює:

$$1.86 \cdot 10^7 \cdot (24 \cdot 10^3) \approx 775 \ \text{МВт} \cdot \text{доб} / \text{кг}.$$

Це означає, що зв'язок між сумарним вигорянням палива *K* (МВт·доб/т) і глибиною його вигоряння визначається виразом:

$$K = 775 \cdot a \qquad (34)$$

3. Вплив регенеративного підігріву на теплову економічність електростанції

Регенеративний підігрів живильної води застосовується на усіх паротурбінних установках. Такий підігрів істотно підвищує теплову і загальну економічність установок. У схемах з регенеративним підігрівом потоки пари, що відводяться з турбіни регенеративні підігрівачі, здійснюють роботу без втрат в холодному джерелі (конденсаторі). При цьому для однієї і тієї ж електричної потужності турбогенератора N_{e}, витрата пари в конденсатор зменшується і ККД установки збільшується.

Кількість пари, що відбирається з відборів, залежить насамперед від температури, до якої може бути підігрітий конденсат турбіни. Чим вищі параметри пари перед турбіною, тим більший інтервал температур, на який може бути здійснений підігрів конденсату, і більший ефект від застосування схеми з регенеративним підігрівом. Зазвичай, на електростанціях середніх параметрів температура живильної води знаходиться в межах від 150 до 170°С; при високих тисках – від 225 до 275°С (при номінальному навантаженні та номінальних параметрах пари перед турбіною).

На паротурбінних установках електростанцій, що працюють на органічному паливі, застосовують тільки перегріту пару; в атомній енергетиці широко використовують також насичену пару.

На рис.1а, наведено теоретичну схему підігріву живильної води при трьох регенеративних підігрівачах. За цією схемою регенеративний підігрів ведеться всім потоком робочого середовища. За такої організації процесу регенеративні підігрівачі, прохідні перерізи відборів та комунікацій громіздкі, а втрати в них на тертя надмірно великі. Крім того, зростає вологість пари в останніх щаблях турбіни. Тому в реальних установках регенеративні підігрівачі відводиться не весь потік пари, а лише невелика його частина (рис.1б). Тут ця пара конденсується, віддаючи своє тепло живильній воді. Конденсат, що утворився при цьому, вводять в загальний потік живильної води. За такої схеми витрата пари в турбіні зменшується від одного відбору до іншого. Для однієї й тієї потужності турбіни загальні витрати пари зростають, оскільки потік, виведений в регенеративну систему, здійснює меншу роботу, ніж потік, що надійшов у конденсатор. В результаті висота лопаток у частині високого тиску (ЧВТ) виходить більшою, ніж для турбіни без регенеративних відборів, а у частині низького тиску (ЧНТ) – меншою. Це, як відомо, збільшує внутрішній відносний ККД η_{0i}. Таким чином, схема, що застосовується на реальних установках, не тільки усуває недоліки циклу з постійною витратою пари, але і дає можливість

виконати проточну частину турбіни більш досконалої.

На рис. 2 у *T-s* діаграмі зображені регенеративні цикли при адіабатичному розширенні насиченої та перегрітої пари, коли підігрів живильної води здійснюється ізобарично у багатьох підігрівачах. При такій схемі для насиченої пари, коли кількість підігрівачів нескінченно велике, нагрівання води може бути здійснено до температури пари T_0 і східчаста лінія *CD* (рис.2а) робочого процесу перетворюється на плавну криву, еквідистантну кривою підігріву живильної води *AB*. Отриманий цикл називають граничним регенеративним циклом насиченої пари. Легко бачити, що ККД цього циклу дорівнює ККД циклу Карно.

Регенеративний підігрів живильної води в циклі з перегрітою парою також підвищує ККД, проте термічний ККД регенеративного циклу перегрітої пари завжди нижче ККД циклу Карно при одних і тих же початкових і кінцевих температурах. Нагрів живильної води тут може бути здійснений до температури, близької до температури насичення $T_{0,\text{нас}}$, яка зазвичай значно нижче початкової температури пари T_0 (рис. 2б).

З розгляду робочого процесу пари для схеми з регенеративним підігрівом живильної води встановлено, що регенеративний підігрів збільшує ККД установки, незважаючи на те, що витрата пари на турбіну при цьому зростає. Кількісна залежність між значеннями ККД регенеративної та найпростішої конденсаційної установок може бути отримана з наступних співвідношень.

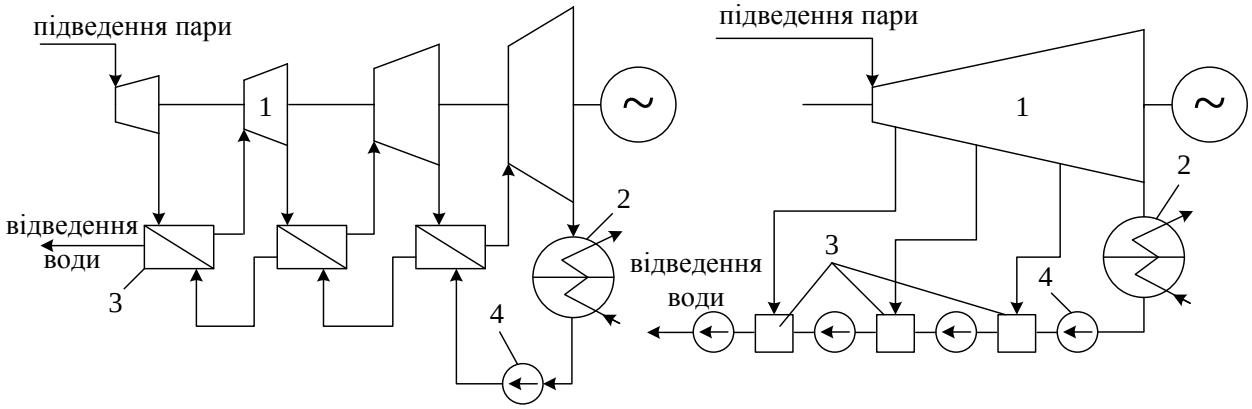
Для схеми з регенеративним підігрівом живильної води у підігрівачах (див. рис. 2б) внутрішній абсолютний ККД $\eta_{i,\text{р}}$ визначається виразом:

$$\eta_{i,\text{р}} = \frac{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right) + \sum_{1}^{z} \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right) + \sum_{1}^{z} \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}, \quad (35)$$

де $\alpha_{j,\text{р}}$ і $\alpha_{\text{к}}$ – частка загальної витрати пари на турбіну, що відбирається в *j*-й відбір і що поступає в конденсатор відповідно; $i_{j,\text{р}}$ – ентальпія пари *j*-го відбору.

Рівняння (35) можна подати у вигляді:

$$\eta_{i,\text{р}} = \frac{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right)} \frac{1 + \dfrac{\sum_{1}^{z} \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right)}}{1 + \dfrac{\sum_{1}^{z} \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right)}} \quad (36)$$

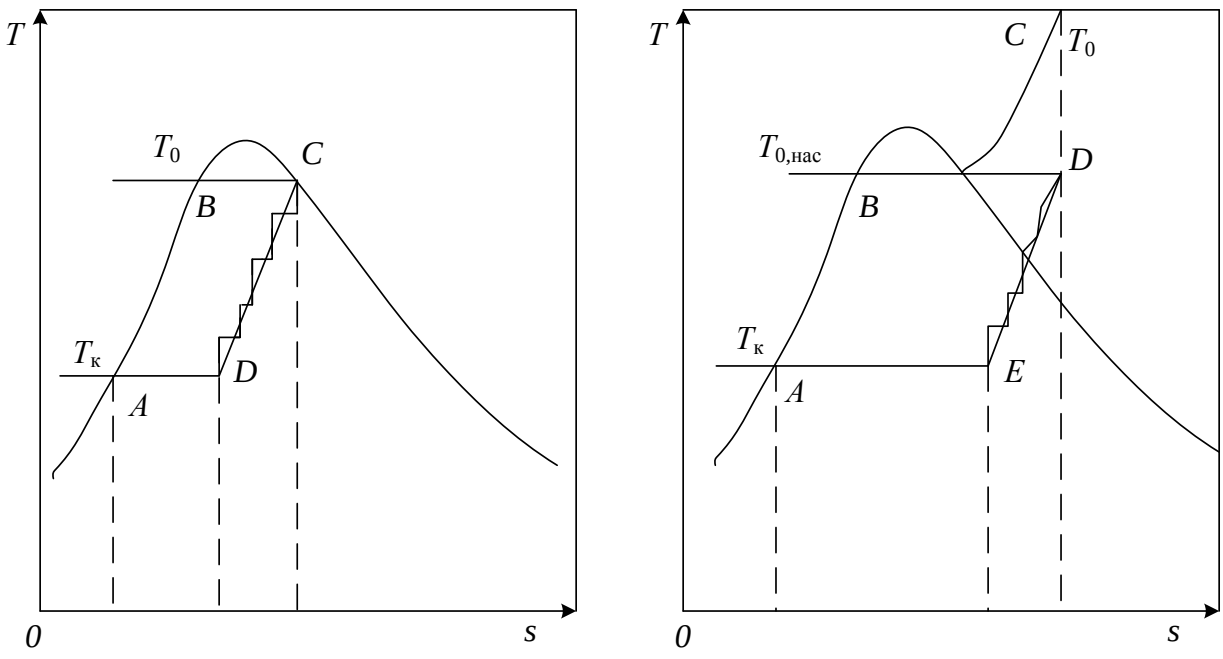


а) б)

1 – турбогенераторна установка; 2 – конденсатор; 3 – регенеративний підігрівач; 4 – насос.
1 – turbogenerator unit; 2 – condenser; 3 – regenerative heater; 4 – pump.

Рис. 1 – Схеми регенеративного підігріву живильної води в трьох регенеративних підігрівачах при відведенні в підігрівачі всього потоку пари (а) (теоретичний цикл) та при відведенні в них невеликої частини пари з відборів турбіни (б).

Fig. 1 - Schemes of regenerative heating of feed water in three regenerative heaters when the entire steam flow is diverted to the heaters (a) (theoretical cycle) and when a small part of the steam from the turbine taps is diverted to them (b).



а) б)

Рис. 2 – Регенеративний цикл для насиченої (а) та перегрітої (б) пари.
Fig. 2 - Regenerative cycle for saturated (a) and superheated (b) steam.

Для схеми з регенеративним підігрівом живильної води у підігрівачах (див. рис. 2б) внутрішній абсолютний ККД $\eta_{i,\text{р}}$ визначається виразом:

$$\eta_{i,\text{р}} = \frac{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right) + \sum_1^z \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right) + \sum_1^z \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}, \quad (35)$$

де $\alpha_{j,\text{р}}$ і $\alpha_{\text{к}}$ – частка загальної витрати пари на турбіну, що відбирається в j-й відбір і що поступає в конденсатор відповідно; $i_{j,\ \text{р}}$ – ентальпія пари j-го відбору.

Рівняння (35) можна подати у вигляді:

$$\eta_{i,\text{р}} = \frac{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right)} \frac{1 + \dfrac{\sum_1^z \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right)}}{1 + \dfrac{\sum_1^z \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}\right)}}. \quad (36)$$

Вираз:

$$\frac{\sum_1^z \alpha_{j,\text{р}}\left(i_0 - i_{j,\text{р}}\right)}{\alpha_{\text{к}}\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right)} = A_{\text{р}} \quad (37)$$

є відношенням роботи всіх потоків пари, що відводяться у відбори, до роботи конденсаційного потоку, а відношення $\left(i_0 - i_{\text{к}}^{\text{н}}\right) / \left(i_0 - i_{\text{к}}\right)$ – ККД найпростішої конденсаційної установки (без регенерації).

Таким чином, рівняння (36) набуває вигляду:

$$\eta_{i,\text{р}} = \eta_{i,\text{к}}\left[\left(1 + A_{\text{р}}\right) / \left(1 + A_{\text{р}}\eta_{i,\text{к}}\right)\right]. \quad (38)$$

З рівняння (38) видно, що у всіх випадках, коли $A_{\text{р}}>0$, ККД регенеративного циклу $>\eta_{i,\text{к}}$. Чим більший енергетичний коефіцієнт $A_{\text{р}}$ (тобто робота потоків пари, які у відбір) проти роботи пари конденсаційного потоку, тим більше ефект від застосування регенеративного підігріву ($\alpha_{i,\text{р}}=0, \eta_{i,\text{р}}=\eta_{i,\text{к.}}$) Аналогічний результат буде й у тому випадку, коли на підігрів живильної води відводиться свіжа пара (з лінії до турбіни), оскільки при цьому i_0–$i_{j,\text{р}}$=0 і енергетичний коефіцієнт також дорівнює нулю.

Регенеративні підігрівачі можуть бути змішувального та поверхневого типів. У підігрівачах змішувального типу теплопередача від пари до рідини здійснюється в процесі барботажу та конденсацією пари безпосередньо на струменях і краплях води. Живильна вода

при цьому може бути нагріта до температури насичення пари, який надходить з відбору турбін.

Підігрівачі поверхневого типу бувають з охолоджувачами перегрітої пари і без неї. При відсутності охолоджувача перегрітої пари потік з відбору конденсується на всіх поверхнях теплообміну і температура води на виході з підігрівача завжди на 3-5°С нижче температури насичення пари, що конденсується. У підігрівачах з охолоджувачем перегрітої пари після підігріву в частині підігрівача, що обігрівається парою, що конденсується, потік води проходить ще через поверхні, до яких підведений перегріта пара. Тому тут недогрівання до температури насичення пари відбору $t_н$ виявляється нижче. Однак оскільки витрата пари тут відносно невелика (у порівнянні з витратою живильної води), температура води після поверхневих підігрівачів зазвичай залишається нижчою $t_н$.

При одній і тій же температурі живильної води, чим менше недогрівання до $t_н$, тим більше робота потоку пари відбору і, як видно з рівняння (38), тим вищою є теплова економічність установки. З цього випливає, що найбільший ефект від регенерації буде при застосуванні підігрівачів змішувального типу.

Залежність (38) одержана для конденсаційної установки, що має лише регенеративні відбори. Якщо поряд із відборами на регенеративний підігрів у паросиловій установці є відбори пари на промислові потреби та теплофікацію, то залежність між ККД із виробництва електроенергії $\eta_{i.ТЕЦ}$ для цієї установки і ККД $\eta_{i.к}$ для чисто конденсаційної установки має вигляд:

$$\eta_{i,ТЕЦ} = \eta_{i,к} \frac{1 + A_р + A_{тп}}{1 + \eta_{i,к}\left(A_р + A_{тп}\right)}, \quad (39)$$

$$\text{Де } A_{тп} = \frac{\sum_1^m \alpha_{j,п}\left(i_0 - i_{j,п}\right)}{\alpha_к\left(i_0 - i_к^н\right)} \quad (40)$$

є відношення роботи потоків пари, що відводяться до теплового споживача, до роботи конденсаційного потоку.

З рівняння (39) видно, що регенеративний підігрів живильної води на установках з комбінованим виробленням електроенергії та тепла в тепловому відношенні також ефективний і тим більшою мірою, чим вище значення енергетичного коефіцієнта $A_{тп}$. Однак за одних і тих же значень $A_р$, відносна зміна ККД з виробництва електроенергії на ТЕЦ $\eta_{i.ТЕЦ}$ менше зміни ККД η_i для конденсаційної установки.

Енергетичні коефіцієнти $A_р$ і $A_{тп}$ залежать як від відносних витрат потоків пари, що спрямовуються у відбір, так і від перепаду ентальпії (i_0–i_j), що використовується в турбіні. Чим нижче тиск у відборі, тим при однакових витратах пари у відборі вище абсолютне значення коефіцієнта і більший ефект, який надається відбором на зміну ККД. Тому для турбін з протитиском регенеративний підігрів підвищує економічність установки (збільшує вироблення електроенергії на тепловому споживанні) тільки тоді, коли він здійснюється додатковою витратою пари, понад необхідну для потреб виробництва. У турбінах з регульованими відборами регенеративні відбори, розташовані після промислового, в розрахунку на одну і ту ж кількість пари, що відбирається, мають більший вплив на ККД $\eta_{i.ТЕЦ}$ і тому іноді застосування регенеративного підігріву живильної води може призвести до збільшення ККД навіть при деякому зменшенні витрати пари споживачеві $D_п$. Однак щоб не завдати шкоди тепловому споживачеві, витрата пари $D_п$ зменшувати не слід і регенерацію в цих установках також потрібно здійснювати, збільшуючи загальні витрати пари на турбіну.

Висновки

1. Виконано систематизацію та аналіз наявних методів оцінки показників якості електростанцій різних типів, а саме теплової економічності, показано вплив витрат енергії на власні потреби на значення ККД електростанцій.

2. Проаналізовано вплив регенеративного підігріву живильної води на

теплову економічність електростанцій; показано, що регенеративний підігрів парою з відборів турбіни збільшує ККД теплоенергетичної установки, незважаючи на те, що витрата пари через турбіну при цьому зростає.

3. Проаналізовано вплив недогріву пари до температури насичення теплової економічності теплоенергетичної установки; встановлено, що найбільший ефект від регенерації буде при застосуванні підігрівачів змішувального типу.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1 Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність : нова енергетична стратегія України до 2035 року. – Режим доступу : https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf (дата звернення 24. 9. 2024)

2. Alpeev A.S. Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants / A.S. Alpeev// Atomic Energy 90(2):109-112 February 2001. DOI:10.1023/A:1011344806693

3. Фурман І.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами / І.О. Фурман, В.А. Краснобаєв, П.П. Рожков, С.О. Тимчук, С.С., Радченко: –Харків: Факт, 2006. –317 с.

4. Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence / Qi Wang // Conference: 2023 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS). September 2023. DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027

5. Грінченко Г.С. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників / Г.С. Грінченко, Т.Ю. Василець, О.В. Купріянов, О.М. Близниченко, Т.М. Фурсова // Збірник наукових праць «Машинобудування». –Харків, 2023, No31, –С.71-79. DOI: https://10.32820/2079-1747-2023-31-71-79

6. Чепурний М.М. Застосування прибудованих теплофікаційних турбін на промислових теплоелектроцентралях / М.М. Чепурний, С.Й. Ткаченко, С.В. Дишлюк // Енергетика та електротехніка. Наукові праці ВНТУ, 2010, № 2 –С.1-6.

7. Чеботарьов А.М. Аналіз нормативного забезпечення ефективності роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій / А.М. Чеботарьов, Ю.О. Бондаренко // Машинобудування, – Харків. –№29, 2022. –С.97-103. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-97-103

8. Канюк Г.І. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів / Г.І.Канюк, Т.М.Фурсова, А.Ю.Мезеря, О.А.Долматов, С.О.Заїка, П.Р.Галинський // Збірник наукових праць «Машинобудування». – Харків. №31. –2023. –С.42-49. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-42-49

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

10. 7. Коберник В.С. Техніко-економічні показники технологій теплової енергетики, що експлуатуються в маневрених режимах / В.С. Коберник // The Problems of General Energy, 2021, issue 3(66). –P.36-42. DOI: https://10.15407/pge2021.03.036

11. Кострыкин В.А., Шелепов И.Г., Шубенко А.Л., Казак И.А., Щербенок Ю.А. Продление ресурса теплоэнергетического оборудования энергоблоков АЭС. Сб. научных трудов «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования. 2003 г., Харьков, т.2., –С. 431-434

Стаття надійшла для редакції 27. 09. 2024 Стаття рекомендована до друку 12.11.2024

[1]**KANJUK G.,** D.Sc.,
Head of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**MEZERYA A.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1]**FURSOVA T.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: tatiana2507@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1900-7432
[1]**CHYROCHKIN D.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:chirochkin123@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9029-0471
[1]**EPIK O.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:oleksandrepik0@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-4909-6431
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

Kanjuk G., Mezerya A., Fursova T., Chyrochkin D., Epik O. Ways of increase indicators of quality (heat economy) of power plants

The article analyzes performance indicators of thermal and nuclear power plants, namely thermal efficiency, and identifies the main ways to improve them. It is shown that the regenerative heating of the feed water is used in all steam turbine plants and significantly increases the thermal and overall efficiency of the plants. The higher the steam parameters in front of the turbine, the greater the temperature range for which condensate heating can be carried out, and the greater the effect of using a scheme with regenerative heating. It was determined that the regenerative heating of the feed water in the cycle with superheated steam also increases the efficiency, but the thermal efficiency of the regenerative cycle of superheated steam is always lower than the efficiency of the Carnot cycle at the same initial and final temperatures. It has been proven that at the same temperature of the feed water, the less underheating, the greater the work of the steam selection flow and the higher the thermal efficiency of the installation, and the greatest effect from regeneration occurs when using mixing type heaters. It is shown that regenerative heating increases the installation's efficiency for turbines with back pressure only when it is carried out by additional steam consumption beyond what is required for production. In turbines with adjustable withdrawals, regenerative withdrawals located after the industrial one, based on the same amount of steam withdrawn, have a greater impact on the efficiency, and therefore sometimes the use of regenerative heating of the feed water can lead to an increase in efficiency even with a slight decrease in the consumption of steam to the consumer. The systematization and analysis of the existing methods for assessing the thermal efficiency of power plants of various types is carried out, and the influence of energy consumption on own needs on the efficiency of power plants is shown.

KEYWORDS: *quality indicators, energy saving, efficiency, power plant.*

In cites: Kanjuk G., Mezerya A., Fursova T., Chyrochkin D., Epik O., (2024). Ways of increase indicators of quality (heat economy) of power plants. *Engineering*, (34), 61-71. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-06 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospromozhnist : Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku, 2015, [Security, energy efficiency, competitiveness: New energy strategy of Ukraine until 2035.], viewed September 24. 2024 <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf>
2. Alpeev, AS 2001, ‘Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants’, *Atomic Energy*, no 90(2), Pp. 109-112 DOI:10.1023/A:1011344806693
3. Furman, IO, Krasnobayev, VA, Rozhkov, PP, Timchuk, SO & Radchenko, SS 2006, *Avtomatizovani sistemi keruvannya tehnologichnimi procesami* [Automated process control systems], Fakt, Harkiv.

4. Wang, Qi 2023, 'Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence', *Conference: 2023 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*, DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027

5. Grinchenko, GS, Vasilec, TYu, Kupriyanov, OV, Bliznichenko, OM & Fursova, TM 2023, [Improving the quality of ASC of thermal power plants by specifying the optimality criteria for technical and economic indicators.], Engineering, No 31, Pp.71-79. DOI: https://10.32820/2079-1747-2023-31-71-79

6. Chepurnij, MM, Tkachenko, SJ & Dishlyuk, SV 2010, 'Zastosuvannya pribudovanih teplofikacijnih turbin na promislovih teploelektrocentralyah' [Application of attached heat turbines in industrial thermal power plants.], *Energetika ta elektrotehnika. Naukovi praci VNTU*, 2010, № 2, Pp. 1-6.

7. Chebotarov, AM & Bondarenko, YuO 2022, [Analysis of the regulatory support for the efficiency of systemelements of low-potential complexes at power plants], Engineering, № 29, Pp. 97-103. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-97-103

8. Kanyuk, GI, Fursova, TM, Mezerya, AYu, Dolmatov, OA, Zayika, SO & Galinskij, PR 2023, [Increasing the Operational Reliability and Efficiency of Boiler Plant Equipment of Thermal Power Stations by Improving the Quality of Measuring their Technological Parameters.], Engineering, № 31, Pp. 42-49. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-42-49

9. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu, Mihajskij, DV, Laptinov, IP & Fokina, AR 2012, *Rezervy energosberegayushego upravleniya tehnologicheskimi processami na dejstvuyushih TES i AES* [Reserves of energy-saving management of technological processes at operating thermal power plants and nuclear power plants], A.R.Fokina Tochka, Harkov.

10. Kobernik, VS 2021, [Technical and economic indicators of thermal power technologies operated in maneuvering modes.], *The Problems of General Energy*, issue 3(66), Pp. 36-42. DOI: https://10.15407/pge2021.03.036

11. Kostrykin, VA, Shelepov, IG, Shubenko, AL, Kazak, IA & Sherbenok, YuA 2003, 'Prodlenie resursa teploenergeticheskogo oborudovaniya energoblokov AES' [Extension of the service life of thermal power equipment of NPP power units], *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya*. Vol. 2, Pp. 431-434

The article was received by the editors 09/27/2024
The article is recommended for printing 11/12/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-07
УДК 621.311.22

[1]**Г.І. КАНЮК,** доктор технічних наук
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**А.Ю. МЕЗЕРЯ,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1]**В.С. ВІТЕР,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3882-4675
[1]**В.Є. МАЛЮТА,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: Sony199325@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0789-442X
[1]**С.В. НАСИРОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: nasirov1980@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9599-8306
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ

В роботі встановлені співвідношення, які дозволяють визначати основні показники якості електростанцій при їх модернізації та реконструкції, до яких відносяться, насамперед, техніко-економічні показники, що може скласти основу для аналізу показників якості модернізації. Визначені основні причини виникнення перевитрати палива при модернізації та реконструкції: вимушене зменшення енергетичного навантаження через часткові та повні відмови її елементів та погіршення енергетичних характеристик та характеристик міцності внаслідок фізичного та морального зношування обладнання. Встановлені залежності, які визначають рентабельність модернізації та реконструкції обладнання електростанцій. Наведені витрати, які є сумою річних витрат і нормативного прибутку, тобто характеризують витратну складову ефективності модернізації. Визначено додаткові витрати палива, які виникають при консервації обладнання. Визначено, що погіршення якості палива призводить до необхідності збільшення підсвічування газом або мазутом. При цьому збільшення підсвічування призводить до збільшення витрати палива, яке пов'язане з підсушуванням палива та розпиленням мазуту. Показано, що витрати палива, які пов'язані з перевитратою палива при експлуатації енергоблоків в сталих режимах роботи при часткових відмовах, залежать від середнього значення коефіцієнта корисної дії. Наведено, що витрати електроенергії на власні потреби значною мірою залежить від режиму роботи енергоблоку, від його навантаження. Часті пуски та зупинки енергоблоків, зниження та збільшення навантаження призводять до значних перевитрат палива в залежності від їх частоти і тривалості. Тобто перевитрата палива залежить від роботи енергоблока (у період пуску та зупинки) та кількості пусків та зупинок.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *показники якості, економічність, електростанція, техніко-економічні показники, модернізація, енергозбереження*

Як цитувати: Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Вітер В. С., Малюта В. Є., Насиров С. В. Аналіз показників якості електростанцій при модернізації. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 72-81. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-07

© Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Вітер В. С., Малюта В. Є., Насиров С. В., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

У процесі експлуатації обладнання електростанцій відбувається його моральне та фізичне старіння.

Національна енергетична Стратегія України до 2035 року передбачає щорічні інвестиційні вкладення на реконструкцію та модернізацію наявних енергетичних об'єктів, переважно ТЕС обсягом близько 1 млрд дол. Складне економічне та фінансове становище енергетичної галузі не дозволяє забезпечити фінансування за рахунок власних накопичень чи бюджетних коштів.

Однією з ключових проблем розвитку енергетики є залучення додаткових ресурсів як зовнішніх, так і внутрішніх. З огляду на це Міненерго проводить послідовну політику залучення коштів іноземних інвесторів та кредиторів для реабілітації генеруючих джерел електроенергії. Найбільш доступними кредиторами виявилися Світовий банк та Європейський банк реконструкції та розвитку, політика яких спрямована на розвиток інфраструктури у країнах із перехідною економікою.

Модернізація виробництва проводиться з метою удосконалення характеристик енергетичного обладнання, яке ще не виробило технічний ресурс, але за техніко-економічними показниками не відповідає сучасним вимогам. Модернізація може відбуватися в період капітальних ремонтів енергоблоків, включаючи реконструкцію вузлів та елементів або їх заміну.

Основними завданнями модернізації енергоблоків є:

- підвищення техніко-економічних показників (ККД, питомих витрат, палива та теплоти);
- зменшення негативного впливу на довкілля відповідно до міжнародних норм;
- підвищення надійності;
- збільшення технічного ресурсу.

Кожне з перелічених завдань вирішується за дотримання вимог, сформульованих у наступних задачах. Наприклад: підвищення техніко-економічних показників має відбуватися за дотримання вимог екології, надійності, довговічності.

У зв’язку з тим, питання визначення техніко-економічних показників при модернізації обладнання є актуальною задачею та відповідає сучасним тенденціям розвитку країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналізу та підвищенню техніко-економічних показників (ТЕП) теплових і атомних електростанцій присвячено велику кількість наукових та науково-практичних робіт. Підвищення техніко-економічних показників є одною з основних задач Нової Стратегії розвитку України на період до 2035 року [1].

Важливішим питанням, якому приділяється увага, є аналіз та підвищення техніко-економічних показників електростанцій в сталих режимах [2, 3, 4, 5]. Проводиться корекція ТЕП [6] та експериментальні дослідження з метою покращення ТЕП [7]. Підвищується якість автоматизованих систем керування теплових електростанцій шляхом уточнення критеріїв оптимальності техніко-економічних показників [8] та запроваджуються заходи, щодо практичної реалізації задач розрахунку та аналізу ТЕП [9]. Останнім часом, внаслідок бойових дій, актуальність набуває питання впровадження та експлуатації розподілених енергосистем, у зв’язку з чим, проводиться оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення, в тому числі з транзактивним керуванням [10].

Порушення штатних режимів роботи електростанцій призводить до необхідності переведення їх в маневровий режим. Аналізу, оптимізації та підвищенню ТЕП електростанцій та окремих енергоблоків в маневрових режимах приділяється велика увага [11, 12, 13].

Беручи до уваги проєкти з реконструкції та модернізації електростанцій, які будуть впроваджені, в тому числі, Європейським Союзом в Україні після закінчення бойових дій, встає питання економічної ефективності модернізації. Тому аналіз техніко-економічних показників електростанцій при їх модернізації набуває актуальності.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є аналіз техніко-економічних показників електростанцій при модернізації та реконструкції, що дасть змогу визначати економічну ефективність модернізації за різними варіантами модернізації (часткова, повна) та параметри інвестиційної привабливості.

Виклад основного матеріалу

В якості критеріїв економічної ефективності інвестицій прийняті: прибуток (*П*) – ефект в абсолютних величинах, який отримає ТЕС в результаті модернізації. Він характеризується перевищенням доходів ТЕС над витратами з вироблення та відпуску теплової та електричної енергії.

Для оцінки прибутку щорічно або для характерних років розрахункового періоду (перших років експлуатації, найбільш прибуткового року, кінця періоду), а також для інвестиційних проєктів з нетривалими термінами будівництва (1-2 роки) та практично постійними щорічними доходами та витратами, зручним критерієм ефективності капітальних вкладень є чистий річний прибуток:

$$П = Д - З, \quad (1)$$

де *Д* – вартість реалізованої продукції та інші доходи протягом року; *З* – річні витрати на вироблення електроенергії, які складаються з наступних елементів:

$$З = В + ЕК, \quad (2)$$

де *В* – щорічні експлуатаційні витрати (включаючи амортизаційні відрахування на реновацію); *Е* – норма прибутку (банківська відсоткова ставка); *К* – капітальні вкладення у проєкт.

Рентабельність (*R*), яка у свою чергу поділяється на декілька видів: рентабельність інвестицій, дисконтна рентабельність інвестицій, загальна рентабельність за прибутком, внутрішня норма рентабельності, відображає частку витрат, що повертається щорічно у вигляді прибутку ТЕС або АЕС:

$$R = \frac{П}{К}. \quad (3)$$

Період повернення капіталу (*T*) (термін окупності інвестицій, який вкладено в модернізацію):

$$T = \frac{1}{R} = \frac{П}{К}. \quad (4)$$

Якщо період повернення капіталу менший за термін служби, то інвестиції можна вважати ефективними.

Наведені витрати (3), які є сумою річних витрат (собівартості) і нормативного прибутку, тобто характеризують витратну складову ефективності модернізації.

Розмір, що характеризує нижню одиницю вартості реалізованої продукції, коли він здійснює інвестиції рівноцінно альтернативному розміщенню капіталу з нормативом ефективності *E*:

$$З = ЕК + \sum I, \quad (5)$$

де *К* – капітальні вкладення; *I* – щорічні витрати на вироблення електричної та теплової енергії на ТЕС, що включають амортизаційні відрахування на реновацію.

Наведені витрати є сумою річних витрат (собівартості та нормативного прибутку). Щорічні витрати можна визначити за такою формулою:

$$\sum I = I_{ка} + I_{т} + I_{екол} + I_{екс} + I_{зам} + I_{рен} + I_{рек} + I_{г}. \quad (6)$$

Структура витрат на виробництво енергії на ТЕС, як загальної технологічної схеми, так і підсистеми та окремих елементів однакова і складається з найбільш характерних статей.

Укрупнена сума витрат має вигляд:

$$\sum I_i = I_{кi} + I_{тi} + I_{ексi}. \quad (7)$$

Однак, враховуючи значення до вимог екології та надійності зростає, виникає необхідність у виділенні (відокремленні) витрат на ці статті:

$$\sum I_i = I_{кi} + I_{тi} + I_{ексi} + I_{екол} + I_{гi}, \quad (8)$$

де $I_{гi}$ – витрати пов'язані з надійністю, які можуть входити до складу будь-яких з вище перерахованих витрат.

Але комплексний підхід до оптимізації потребує виділення витрат $I_{гi}$ у самостійну статтю. Статтю витрат, пов'язаних з амортизаційними

відрахуваннями ($I_{\text{кі}}$), для окремих підсистем та елементів визначити важко, але при поетапній та поелементній оптимізації ця складова необхідна.

Витрати паливо, є основними для ТЕС. Вони визначаються з урахуванням найімовірніших варіантів використання енергетичного устаткування енергоблоків.

Річні витрати на паливо залежать від витрати палива, його видів, якості та ціни:

$$I_{\text{т}} = \sum_{1}^{i} B_{\text{г}i} \cdot Ц_{\text{т}i}\,, \tag{9}$$

де $B_{\text{г}i}$ – витрата *i*-го виду палива, за аналізований період, т; $Ц_{\text{т}i}$ – вартість *i*-го виду палива, за період, що розглядається, грн/т

Загальна витрата натурального палива енергоблока може бути визначена за формулою:

$$\sum_{1}^{i} B_{\text{г}i} = \sum B_{\text{г}} = \sum_{1}^{i} \frac{123}{\eta_{\text{с}i}} \frac{Q^{У}_{\text{н.у.}}}{\eta_{\text{с}i}} \cdot 10^{-6} E_{\text{г}i}\,, \tag{10}$$

де $Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}$ – теплота згоряння *i*-го палива, кДж/кг; $E_{\text{г}i} = \sum N_i \cdot \tau_i$ – кількість електроенергії виробленої на *i*-му паливі, кВт·год; τ_i – час роботи на *i*-му паливі, год.

Для визначення витрати палива на ТЕС, з урахуванням зміни навантажень, пуско-зупинних операцій, консервації обладнання, а також зміни якості палива можна скористатися виразом:

$$\sum B_{\text{г}} = \sum B_{\text{гн}} + \Delta B_{\text{ц}} + \Delta B_{\text{по}} + \Delta B_{\text{кс}} + \Delta B_{Q}\,, \tag{11}$$

де $\sum B_{\text{гн}}$ – витрата палива для забезпечення проєктного навантаження, т; $\Delta B_{\text{ц}}$ – втрати (перевитрата) палива, пов'язані зі зміною навантаження, т; $\Delta B_{\text{по}}$ – втрати палива при пуско-зупинних операціях, т; $\Delta B_{\text{кс}}$ – втрати палива внаслідок тривалого резерву (консервації), т; ΔB_{Q} – втрати палива внаслідок зміни якості, т.

При тривалій експлуатації енергоблоків у режимах часткових навантажень, обумовлених старінням та зношуванням обладнання, відбувається збільшення витрати палива внаслідок зниження економічності [8].

У цьому випадку витрати пального можна визначити так:

$$\sum B_{\text{ц}} = \sum b_{\text{ц}i} \cdot E_{\text{ц}i} = \sum_{1}^{i} \frac{123}{\eta_{\text{вп}i}} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} \cdot N_{ri} \cdot \tau_{ri} \cdot 10^{-6}, \tag{12}$$

де $b_{\text{ц}i}$ – питома витрата палива при частковому *i*-му навантаженні; $\eta_{\text{вп}i}$ – ККД станції при *i*-му частковому навантаженні; τ_{ri} – час часткового *i*-го навантаження.

Зміна витрати палива порівняно з номінальним режимом (*N*) за період часу $\tau = \sum \tau_{ri}$, буде представляти різницю:

$$\Delta B_{\text{ц}} = \sum B_{\text{ц}} - B = \left[\frac{123}{\eta_{\text{сч}i}} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} \cdot N_{ri} \cdot \tau_{ri} - \frac{123}{\eta_{\text{с}}} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} \cdot N\tau \right] \cdot 10^{-6} =$$

$$= 123 \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} \tau \left(\sum \frac{N_{ri}}{\eta_{\text{сч}i}} - \frac{N}{\eta_{\text{с}}} \right) = 123 N \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} \tau \left(\sum \frac{N_{ri}}{N} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{сч}i}} - \frac{1}{\eta_{\text{с}}} \right) \cdot 10^{-6} \tag{13}$$

За допомогою формули (13) можна визначати зміну витрати палива, як при переведенні енергоблока на постійний (тривалий) режим експлуатації, так і на тимчасовий, що викликається приватними відмовами в енергетичному обладнанні.

При короткочасних, але частих зниженнях навантаження необхідно враховувати збільшення витрати палива в результаті пуско-зупинних операцій ($\Delta B_{\text{по}}$), тобто для цього випадку:

$$\Delta B_{\text{чг}} = \Delta B_{\text{ч}} + \Delta B_{\text{по}}\,. \tag{14}$$

Значення ККД ($\eta_{\text{сч}i}$) можуть визначатися або за допомогою енергетичних характеристик енергоблоків або аналітично.

Втрати палива за час запуску енергоблоку визначаються шляхом підсумовування втрат на електростанції:

$$\Delta B_{\text{по}} = \frac{\sum_{1}^{6} \Delta B_i^{\text{по}}}{\Delta B_i^{\text{п}}}. \qquad (15)$$

При цьому $\Delta B_i^{\text{п}}$ складається із сумарних витрат власне палива ($\Delta B_i^{\text{т}}$), палива та отримання теплової енергії від стороннього джерела (на забезпечення пуску) ($\Delta B_i^{\text{п}}$) та палива на електроенергію від побудованого джерела ($\Delta B_i^{\text{е}}$) тобто:

$$\Delta B_i^{\text{по}} = \Delta B_i^{\text{т}} + \Delta B_i^{\text{п}} + \Delta B_i^{\text{е}}. \qquad (16)$$

Приймаючи єдиний еквівалент – умовне паливо, маємо:

$$\Delta B_i^{\text{т}} = \frac{B_i^{\text{т}} \cdot Q_{\text{н}i}^{\text{р}} \cdot 10^{-3}}{29{,}27}, \text{ т}. \qquad (17)$$

Перевитрата палива, витраченого на отримання пари від стороннього джерела (з відбору турбін):

$$\Delta B_i^{\text{п}} = \frac{Д_i^{\text{п}} (h_{\text{п}} - h'_{к}) \xi_{\text{п}} \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{к}}^{\text{н}} \cdot 29{,}27}, \text{ т}, \qquad (18)$$

де $Д_i^{\text{п}}$ – споживання пари на *i*-му етапі, т; $h_{\text{п}}, h'_{к}$ – ентальпії пари та конденсату, кДж/кг; $\xi_{\text{п}} = y_{\text{п}} \frac{h_0 - h'_{\text{жв}}}{h_{\text{т}} - h'_{\text{от}}}$ – коефіцієнт теплоти пари відбору; $y_{\text{п}} \frac{h_0 - h'_{\text{жв}}}{h_{\text{т}} - h'_{\text{от}}}$ – коефіцієнт недовироблення пари відбором; h_0, $h_{\text{т}}$, $h_{\text{к}}$, $h_{\text{п}}$, $h'_{\text{от}}$, $h'_{\text{жв}}$ – відповідно, ентальпії гострої пари турбіни, теплофікаційного відбору, пари на вихлопі з турбіни, конденсату пари відбору, живильної води при використанні пари від котельної установки $\xi_{\text{п}} = 1$, тобто:

$$\Delta B_i^{\text{п}} = \frac{Д_i^{\text{п}} (h_{\text{п}} - h'_{к}) \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{к}}^{\text{н}} \cdot 29{,}27}, \qquad (19)$$

Перевитрата палива на отримання електроенергії від стороннього джерела на здійснення пуску:

$$\Delta B_i^{\text{е}} = E_i^{\text{вп}} \frac{123}{\eta_{\text{е.вп}}} \cdot 10^{-6}, \ T \qquad (20)$$

де $E_i^{\text{вп}}$ – витрати електроенергії на *i*-й період пуску, кВт·год; $\eta_{\text{е.вп}}$ – електричний ККД енергоблоку, що забезпечує пуск.

Повсюдне зниження вугільного промислового виробництва, залишаючись визначальною тенденцією на сучасному етапі та в найближчій перспективі, призвело до суттєвого скорочення енергопостачання у виробничих галузях. Як наслідок, спостерігається збільшення тривалості простою основного обладнання ТЕЦ, ТЕС та АЕС [6].

Основне енергетичне обладнання, що виводиться з дії, значною мірою піддається так званій стоянковій корозії. Корозійні пошкодження за свідченням вітчизняних та закордонних експлуатаційників різко знижують надійність та довговічність обладнання та можуть призводити зокрема до важких аварій турбоагрегатів. У зв'язку з цим, «Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж» рекомендується при виведенні турбіни в резерв на 7 діб і більше вжити заходів для її консервації.

Основні заходи та вимоги до методів та засобів консервації енергетичного обладнання:

- вони повинні надійно та ефективно забезпечувати зберігання виробів протягом заданих термінів консервації;
- бути високотехнологічними, тобто. не викликати ускладнення процесів консервації, розконсервації та догляду за виробами в період їхнього вимушеного простою;
- не чинити негативного впливу на інші матеріали в період консервації;
- відповідати прийнятим нормам безпеки (вибухо- та пожежобезпечність, нетоксичність, екологічність) та ергономічності;
- бути економічно вигідними та недефіцитними.

Аналіз всього спектра запропонованих нині методів і засобів консервації енергетичного устаткування показує, що пошук оптимальних шляхів вирішення зазначеної проблеми завершено і має здійснюватися з урахуванням конкретного типу устаткування.

Існуючі способи консервації можна умовно розділити на «мокрі» та «сухі». До перших відноситься заповнення об'єму, що консервується, спеціальними водними розчинами інгібіторів атмосферної корозії.

Залежно від способу консервації енергетичного обладнання, змінюється величина втрат палива.

При «гарячій» консервації парою, додаткова витрата умовного палива може бути визначена залежно від джерела отримання пари (з відборів турбіни або котельної установки) за допомогою формул (10) та (11).

Витрата електричної енергії обладнанням, яке перебуває на консервації, призводить також до збільшення витрати палива на ТЕС (енергоблоках що діють). Додаткова витрата палива при цьому може бути визначена за формулою (20).

Таким чином, сумарна додаткова витрата умовного палива на час «гарячої» консервації становитиме:

$$\Delta B_{\text{конс}} = \Delta B^{\text{п}}_{\text{конс}} + \Delta B^{\text{е}}_{\text{конс}}, \qquad (21)$$

де $\Delta B^{\text{п}}_{\text{конс}}$ – додаткова витрата палива на отримання пари, т; $\Delta B^{\text{е}}_{\text{конс}}$ – додаткова витрата палива на електроенергію.

Опалювальні пристрої котельних установок мають оптимальні показники тільки при спалюванні палива, передбаченого проєктом.

Відмінність видів палива призводить до суттєвого впливу на втрати від: механічного недопалу (q_4); зовнішнього охолодження (q_5); теплових втрат із шлаком (q_6). Поруч із цим, якість палива істотно впливає на витрату енергії на власні потреби котельних установок і ТЕС загалом, тобто при постійному навантаженні (котельні установки ($Q_{\text{ку}}$)), зміна якості палива (зольність A, вологість W, теплоти згоряння) $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$) призводить до збільшення витрати палива на величину $\Delta B_{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}$ [11].

Сумарний перевитрата палива залежить від збільшення втрат (зниження ККД брутто $\Delta\eta^{\text{бр}}_{\text{ку}}$) та збільшення витрати електричної енергії ($\Delta\alpha_{\text{вп}}$). Витрата палива при новому режимі становитиме:

$$B^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} = \frac{Q_{\text{ку}_i}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}_i}}, \qquad (22)$$

тобто зниження $Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} < Q^{\text{р}}_{\text{н}}$ та ККД $\eta^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} < \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}}$ при $Q_{\text{ку}_i} = Q_{\text{ку}}$=const відбудеться збільшення витрати палива на:

$$\Delta B^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} = B^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} - B^{\text{бр}}_{\text{ку}} = \frac{Q_{\text{ку}_i}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}_i}} - \frac{Q_{\text{ку}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}}} = \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}} - Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}_i}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} \cdot Q^{\text{р}}_{\text{н}} \cdot \eta^{\text{бр}}_{\text{ку}}},$$

або відповідно, в умовному паливі:

$$\Delta B^{\text{бр}}_{\text{ку}_i(\text{у})} = \Delta B^{\text{бр}}_{\text{ку}_i} \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н}_i}}{Q^{\text{р}}_{\text{ну}}}, \qquad (23)$$

Збільшення витрати палива $\Delta B^{\text{п}}_{\text{ку}_i}$, пов'язане зі збільшенням витрати пари на підсушування палива, розпилення мазуту і т.д.

Збільшення витрати палива $\Delta B^{\text{е}}_{\text{ку}_i}$, внаслідок збільшення $\alpha_{\text{вп}}$ можна визначити за формулою:

$$\Delta B^{\text{е}}_{\text{ку}_i} = \Delta E^{\text{вп}}_{\text{ку}_i} \frac{123}{\eta_{\text{е}}} \cdot 10^{-6}, \text{ т.у.п}, \qquad (24)$$

де

$$\Delta E^{\text{вп}}_{\text{ку}_i} = E^{\text{вп}}_{\text{ку}_i} - E^{\text{вп}}_{\text{ку}} = E^{\text{вп}}_{\text{ку}} \left(\frac{E^{\text{вп}}_{\text{ку}_i}}{E^{\text{вп}}_{\text{ку}}} - 1 \right) = E^{\text{вп}}_{\text{ку}} \left(\frac{\alpha^{\text{вп}}_{\text{ку}_i}}{\alpha^{\text{вп}}_{\text{ку}}} - 1 \right)$$

Крім цього, погіршення якості палива призводить до необхідності збільшення підсвічування газом або мазутом. При цьому збільшення підсвічування призводить до збільшення витрати палива. Таким чином, погіршення якості палива призводить до збільшення втрат в еквіваленті палива:

$$\Delta B_{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} = \Delta B^{\text{бр}}_{\text{ку}_{i(\text{у})}} + \Delta B^{\text{е}}_{\text{ку}_i}. \qquad (25)$$

Таким чином, загальна витрата умовного палива (11) може бути визначена за допомогою формул (18), (19), (20), (21), .25).

З урахуванням конкретних умов експлуатації ТЕС, окремі складові можуть дорівнювати нулю.

Наприклад: $\Delta B_{Q^{\text{р}}_{\text{н}}} = 0$, якщо $Q^{\text{р}}_{\text{н}_i} = Q^{\text{р}}_{\text{н}}$ =const; $\Delta B_{\text{конс}} = 0$ якщо блок не зупиняється на період більше семи діб; $\Delta B_{\text{по}} = 0$, якщо блок несе базове завантаження.

При тривалій експлуатації ($N_{\text{е}\tau} < N_{\text{е}}$) при часткових та повних відмовах на ТЕС і АЕС відбувається перевитрата палива через погіршення їх ККД.

Перевитрата палива ΔB може бути викликана двома причинами:

- вимушеними зменшеннями енергетичного навантаження енергоблока або електростанції через часткові та повні відмови її елементів, підсистем;

- при поступовому зниженні параметрів та погіршенні енергетичних характеристик та характеристик міцності внаслідок фізичного та морального зношування обладнання (це призводить до зниження потужності енергоблоку порівняно з нормально розрахунковою та підвищення питомих витрат палива).

Через війну перевитрати палива відбувається збільшення річних витрат за паливо:

$$\Delta I_{\text{т}} = \sum_{\tau=1}^{R_m} З_{\tau.\text{т}} \cdot \Delta B_{\tau}, \qquad (26)$$

де $З_{\tau.\text{т}}$ – наведені витрати на паливо у аналізований період τ; ΔB_{τ} – перевитрата палива в період *τ*.

Перевитрата палива залежить від питомих витрат палива:

$$\Delta B_{\tau} = b_{\tau} E_{\tau} = b_{\tau} \cdot N_{\text{ет}} \cdot \tau, \qquad (27)$$

де b_{τ} – питома витрата палива енергоблоком, $\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$.

Як відомо, питомі витрати натурального палива пов'язані залежністю:

$$b_{\tau} = b_{\tau\text{у}} \cdot \frac{Q^{\text{р}}_{\text{н.у}}}{Q^{\text{р}}_{\text{н}}}, \qquad (28)$$

де $b_{\tau\text{у}} = \frac{0{,}123}{\eta_{\text{ст}}}$ – питома витрата умовного палива, $\frac{\text{кг.у.п}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}$; $Q^{\text{р}}_{\text{н.у.}}$ і $Q^{\text{р}}_{\text{н}}$ – нижча теплота згоряння палива, умовного та натурального відповідно, кДж/кг.

ККД енергоблоку з вироблення електричної енергії:

$$\eta_{\text{ст}} = \eta_{\text{ку}\tau} \cdot \eta_{\text{ту}\tau} \cdot \eta_{\text{тр.}\tau} \cdot \eta_{\text{г}\tau} (1 - \alpha_{\text{вп}\tau}), \qquad (29)$$

де $\eta_{\text{ку}\tau}, \eta_{\text{ту}\tau}, \eta_{\text{тр.}\tau}, \eta_{\text{г}\tau}, \alpha_{\text{вп}\tau}$ – відповідно ККД котельної та турбінної установок, транспорту, електричного генератора та частка витрати електричної енергії на власні потреби енергоблоку в період *τ*.

Таким чином, як видно з (26)-(29) витрати, пов'язані з перевитратою палива при експлуатації енергоблоків в сталих режимах роботи при часткових відмовах, залежать від середнього значення ККД за період *τ*.

Слід звернути увагу на вплив витрат на потреби енергоблоків на перевитрату палива. Як відомо, витрати електроенергії на власні потреби значною мірою залежить від режиму роботи енергоблоку, від його навантаження.

Часті пуски та зупинки енергоблоків, зниження та збільшення навантаження можуть бути викликані: частковою та повною відмовою елементів та підсистем; графіки споживання енергії.

Часті режими роботи зупинки призводять до значних перевитрат палива в залежності від їх частоти і тривалості. Тобто можна записати:

$$\sum B_{\text{п}\tau} = \sum_{1}^{z} \sum_{\tau=1}^{\tau=\tau_n} b_{\tau i} \cdot N_{\text{е}\tau i} \cdot \tau_i, \qquad (30)$$

перевитрата палива залежить від роботи енергоблока (у період пуску та зупинки) τ_i у режимах $b_{\tau i} > b$ і $N_{\text{е}\tau i} < N_{\text{е}}$ та кількості пусків та зупинок *Z*.

Висновки

Встановлені причини перевитрати палива при модернізації та реконструкції, основними з яких є:

- вимушене зменшення енергетичного навантаження енергоблока або електростанції через часткові та повні відмови її елементів, підсистем;

- зниження параметрів та погіршення енергетичних характеристик та характеристик міцності внаслідок фізичного та морального зношування обладнання (це призводить до зниження потужності енергоблоку порівняно з нормально розрахунковою та підвищення питомих витрат палива);

- погіршення якості палива.

Витрати, пов'язані з перевитратою палива при експлуатації енергоблоків в сталих режимах роботи при часткових відмовах, залежать від середнього значення ККД.

Витрати електроенергії на власні потреби значною мірою залежать від режиму роботи енергоблоку, від його

навантаження. Часті пуски та зупинки енергоблоків, зниження та збільшення навантаження призводять до значних перевитрат палива в залежності від їх частоти й тривалості. Тобто перевитрата палива залежить від роботи енергоблока (у період пуску та зупинки) та кількості пусків та зупинок.

Погіршення якості палива призводить до необхідності збільшення підсвічування газом або мазутом. При цьому збільшення підсвічування призводить до збільшення витрати палива. Таким чином, погіршення якості палива призводить до збільшення втрат в еквіваленті палива.

Встановлені співвідношення, які дозволяють визначати основні показники якості електростанцій при їх модернізації та реконструкції, що може скласти основу для аналізу ефективності модернізації електростанцій.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність : нова енергетична стратегія України до 2035 року. – Режим доступу : https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf (дата звернення 8. 10. 2024)
2. ГКД 34.09.103-96 Розрахунок звітних техніко-економічних показників електростанції про теплову економічність обладнання. Методичні вказівки. – Режим доступу : https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61080 (дата звернення 8. 10. 2024)
3. Дубовський С. В. Техніко-економічні оцінки перспективних природоохоронних технологій теплової енергетики України / С. В. Дубовський, В. С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. – 2013. – № 2(33). – С. 49-56.
4. Залознова Ю. С. Економічні та соціальні проблеми розвитку промисловості : монографія / Ю. С. Залознова ; НАН України, Ін-т економіки промисловості. – Київ, 2017. – 288 с.
5. Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence / Qi Wang // Conference: 2023. International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS). – 2023. DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027
6. Любчик Л. М. Коррекция автоматизированного расчета технико-экономических показателей энергоблока / Л. М. Любчик, Г. Л. Гринберг // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Системний аналіз, управління та інформаційні технології : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – Вип. 19. – С. 45-52.
7. Alpeev A. S. Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants / A. S. Alpeev // Atomic Energy. – 2001. – № 90(2). – С. 109-112. DOI:10.1023/A:1011344806693
8. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників / Г. С. Грінченко, Т. Ю. Василець, О. В. Купріянов, О. М. Близниченко, Т. М. Фурсова // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2023. – Вип. 31. – С. 71-79. DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
9. Пантєлєєва І. В. Реалізація задач розрахунків та аналізу техніко-економічних показників теплових електричних станцій / І. В. Пантєлєєва // Енергетика та Електротехніка. Наукові праці ВНТУ. – 2017. – № 4. – С. 1-6.
10. Бєлоха Г. С. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням : монографія / Г. С. Бєлоха. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 127 с.
11. Шульженко С. В. Техніко-економічні показники виробництва електроенергії АЕС в маневреному режимі / С. В. Шульженко // Проблеми загальної енергетики. – 2016. – Вип. 1. – С. 34-40.
12. Коберник В. С. Техніко-економічні показники технологій теплової енергетики, що експлуатуються в маневрених режимах / В. С. Коберник // The Problems of General Energy. – 2021. – issue 3(66). – Pp. 36-42. DOI.org/10.15407/pge2021.03.036
13. Коберник В. С. Витрати палива технологій теплової енергетики в маневрених режимах / В. С. Коберник // Проблеми загальної енергетики. – 2020. – Вип. 4(63). – С. 45-49. doi.org/10.15407/pge2020.04.045

Стаття надійшла для редакції 10. 10. 2024 Стаття рекомендована до друку 25.11.2024

[1]**KANJUK G.,** D.Sc.,
Head of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**MEZERYA A.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1]**VITER V.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3882-4675
[1]**MALIUTA V.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: Sony199325@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0789-442X
[1]**NASYROV S.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: nasirov1980@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9599-8306
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

ANALYSIS OF QUALITY INDICATORS OF POWER PLANTS DURING MODERNIZATION

The work establishes ratios that allow for determining the main quality indicators of power plants during their modernization and reconstruction, which include, first of all, technical and economic indicators, which can form the basis for the analysis of modernization quality indicators. The main causes of fuel overspending during modernization and reconstruction have been determined: forced reduction of energy load due to partial and complete failures of its elements and deterioration of energy characteristics and strength characteristics due to equipment's physical and moral wear and tear. Dependencies determining the profitability of modernization and reconstruction of power plant equipment are established. The listed costs are the sum of annual costs and regulatory profit, that is, they characterize the cost component of modernization efficiency. Additional fuel consumption that occurs during equipment preservation is determined. It was determined that the deterioration of fuel quality leads to the need to increase lighting with gas or fuel oil. At the same time, an increase in illumination leads to an increase in fuel consumption, which is associated with fuel drying and spraying fuel oil. It is shown that the fuel consumption, which is associated with fuel overconsumption during the operation of power units in stable modes of operation with partial failures, depends on the average value of the efficiency. It is stated that the consumption of electricity for one's own needs largely depends on the mode of operation of the power unit and its load. Frequent starts and stops of power units, load reduction, and increase lead to significant fuel overspending, depending on their frequency and duration. That is, excess fuel consumption depends on the operation of the power unit (during start-up and stoppage) and the number of starts and stops.

KEYWORDS: *quality indicators, efficiency, power plant, technical and economic indicators, modernization, energy saving.*

In cites: Kanjuk G., Mezerya A., Viter V., Maliuta V., Nasyrov S., (2024). Analysis of quality indicators of power plants during modernization. *Engineering*, (34), 72-81. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-07 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. *Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospromozhnist : Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku*, 2015, [Security, energy efficiency, competitiveness: New energy strategy of Ukraine until 2035.], viewed October 8, 2024 https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf
2. *GKD 34.09.103-96 Rozrahunok zvitnih tehniko-ekonomichnih pokaznikiv elektrostanciyi pro teplovu ekonomichnist obladnannya. Metodichni vkazivki* [Calculation of the power plant's reporting technical and economic indicators on the thermal efficiency of equipment. Methodological guidelines], 1996

3. Dubovskij, SV & Kobernik, VS 2013, 'Tehniko-ekonomichni ocinki perspektivnih prirodoohoronnih tehnologij teplovoyi energetiki Ukrayini' [Feasibility studies of promising environmental protection technologies in the thermal power industry of Ukraine.], *Problemi zagalnoyi energetiki*, No 2(33), Pp. 49-56.
4. Zaloznova, YuS 2017, *Ekonomichni ta socialni problemi rozvitku promislovosti* [Economic and social problems of industrial development], Kiyiv.
5. Wang, Qi 2023, 'Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence', *Conference: 2023 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*, DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027
6. Lyubchik, LM & Grinberg, GL 2006, 'Korrekciya avtomatizirovannogo rascheta tehniko-ekonomicheskih pokazatelej energobloka' [Correction of the automated calculation of technical and economic indicators of the power unit.], *Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu «Harkivskij politehnichnij institut». Tematichnij vipusk: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi*, iss. 19, Pp. 45-52.
7. Alpeev, AS 2001, 'Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants', *Atomic Energy*, no 90(2), Pp. 109-112. DOI:10.1023/A:1011344806693
8. Grinchenko, GS, Vasilec, TYu, Kupriyanov, OV, Bliznichenko, OM & Fursova, TM 2023, [Improving the quality of ASC of thermal power plants by specifying the optimality criteria for technical and economic indicators.], Engineering, No 31, Pp.71-79. DOI: https://10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
9. Pantyelyeyeva, IV 2017, 'Realizaciya zadach rozrahunkiv ta analizu tehniko-ekonomichnih pokaznikiv teplovih elektrichnih stancij' [Implementation of tasks: calculation and analysis of technical and economic indicators of thermal power plants.], *Energetika ta Elektrotehnika. Naukovi praci VNTU*, no 4, Pp. 1-6.
10. Byeloha, GS 2023, *Optimizaciya tehniko-ekonomichnih pokaznikiv lokalnih sistem elektrozhivlennya z tranzaktivnim keruvannyam* [Optimization of technical and economic indicators of local power supply systems with transactional control.], KPI im. Igorya Sikorskogo, Kiyiv.
11. Shulzhenko, SV 2016, 'Tehniko-ekonomichni pokazniki virobnictva elektroenergiyi AES v manevrenomu rezhimi' [Technical and economic indicators of electricity production at nuclear power plants in maneuvering mode.], *Problemi zagalnoyi energetiki*, iss 1, Pp. 34-40.
12. Kobernik, VS 2021, [Technical and economic indicators of thermal power technologies operated in maneuvering modes.], *The Problems of General Energy*, issue 3(66), Pp. 36-42. DOI: https://10.15407/pge2021.03.036
13. Kobernik, VS 2020, [Fuel consumption of thermal power technologies under maneuvering modes], *Problemi zagalnoyi energetiki*, iss 4(63), Pp. 45-49. doi.org/10.15407/pge2020.04.045

The article was received by the editors 10/10/2024
The article is recommended for printing 11/25/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-08
УДК 621.311.22

[1]**Г.І. КАНЮК,** доктор технічних наук
завідувач кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**А.Ю. МЕЗЕРЯ,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1]**Т.Ю. ВАСИЛЕЦЬ,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: vasylecz.ty@uipa.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2148-8645
[1]**А.О. ЦВЄТКОВА-КАНЮК,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: annacvetkovakanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9059-4052
[1]**О.Т. ТОЛСТОРЕБРОВ,**
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: oleksandrtolstorebrov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3203-8909
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ДЕКОМПОЗИЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕНЕРГОБЛОКІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В статті наведена структурна схема декомпозиції техніко-економічних показників якості енергоблоків теплових та атомних електростанцій та структура формування економії ресурсів. Показано, що в якості критерія ефективності енергозбереження може бути рекомендована питома величина економії енергії в будь-якому з елементів схеми електростанції відносно сумарного вироблення електроенергії енергоблоком, якому належить цей елемент. Наведено дані щодо витрати електроенергії на власні потреби конденсаційної електростанції залежно від потужності енергоблоків, початкових параметрів пари та виду палива. Наведено, що використання методів еквівалентування та декомпозиції при дослідженні енергозбереження, можна розробити структурні схеми формування показників ефективності (економічності, надійності тощо) для будь-якої технологічної схеми (системи) електричної станції в залежності від витрати первинної енергії. Визначено істотну негативну роль у вирішенні проблем енерго- та ресурсозбереження на теплових і атомних електростанціях за рахунок власних потреб, яка полягає у відсутності методики визначення ефективності енергозберігаючих технологій в окремих системах, підсистемах та елементах технологічної схеми електростанцій та впливу їх на загальностанційні техніко-економічні показники. Проведено аналіз частки окремих агрегатів та підсистем у витраті електроенергії на власні потреби. Показані витрати електроенергії на власні потреби в залежності від навантаження та параметрів енергоблоку. Розроблено структурну схему формування економії при виробництві електроенергії на електростанціях, яка дозволяє оцінювати ефективність та взаємний вплив енергозберігаючих технологій у будь-якій підсистемі та її елементах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *техніко-економічні показники, енергозбереження, економічність, електростанція.*

Як цитувати: Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Василець Т. Ю., Цвєткова-Канюк А. О., Толсторебров О. Т. Декомпозиція техніко-економічних показників якості енергоблоків електростанцій. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 82-91. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-08

© Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Василець Т. Ю., Цвєткова-Канюк А. О., Толсторебров О. Т., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

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

Теплові та атомні електричні станції є складними технічними системами, що складаються з підсистем та елементів, що забезпечують вироблення електричної та теплової енергії. При цьому, взаємодіючи в єдиному процесі, вони виконують різні функції, як забезпечують вироблення енергії, її передачу і перетворення; підвищують ефективність вироблення енергії; забезпечують високу надійність та довговічність функціонування, як усієї системи в цілому, так і її підсистем та елементів; знижують негативний вплив електростанції на довкілля; забезпечують безпечну роботу обслуговуючого персоналу.

Найближчим часом, долю неекономічних блоків в Україні доведеться вирішувати шляхом впровадження маловитратних, економічно чистих енерготехнологій переведення конденсаційних електростанцій (КЕС) у режим теплоелектроцентралей (ТЕЦ), впровадження технологій спалювання низькосортних палив при витісненні рідкого та газоподібного палив, удосконалення низькопотенційних комплексів тощо.

У цьому будь-яка електрична станція може бути об'єктом системного підходу під час аналізу рівнів енергозбереження у ньому. Оскільки сумарний рівень енергозбереження складної технічної системи електростанції залежить від рівня енергозбереження в підсистемах та окремих елементах, необхідно встановити зв'язок і взаємний вплив їх між собою і системами в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням аналізу, дослідження та підвищенню техніко-економічних показників роботи електростанцій та окремих її елементів присвячено велику кількість наукових робіт. Найбільш повно в літературі відображені питання підвищення техніко-економічних показників роботи окремого обладнання, наприклад, підвищення показників якості системи автоматичного регулювання турбогенераторних установок [1], підвищення ефективності роботи систем низькопотенційного комплексу [2], підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій [3] та інше. Досить вичерпно освітлені питання визначення загальностанційних техніко-економічних показників [4, 5] як в сталому режимі роботи, так і в маневрових [6, 7]. Підвищуються техніко-економічні показники як шляхом удосконалення систем керування [8, 9] так і шляхом оптимізації режимів роботи обладнання [2], удосконалення якості вимірювань [3] та впровадження автоматизованого розрахунку [10].

Корисні напрацювання в цьому напряму знайшли своє відображення в національній енергетичній Стратегії України на період до 2035 року [11]. В енергетичній Стратегії питання підвищення техніко-економічних показників систем генерації, розподілу та споживання енергії займають провідну роль та обґрунтовано доведена їх актуальність.

Незважаючи на це, в наявній науковій методології бракую належної систематизації та упорядкування техніко-економічних показників за видом обладнання та їх підпорядкованості, що не дає повною мірою прогнозувати та визначати вплив окремих енергозберігаючих заходів на загальні техніко-економічні показники.

Постановка мети та завдання дослідження

Метою роботи є упорядкування та ієрархізація техніко-економічних показників якості електростанцій та її окремих елементів та визначення їх взаємного впливу у будь-якій підсистемі та її елементах шляхом використання методів декомпозиції та еквівалентування.

Виклад основного матеріалу
1.Декомпозиція техніко-економічних показників якості

Одним з основних показників ефективності є питома собівартість електроенергії, що виробляється на електростанціях, яка в основному залежить від питомої витрати палива $b_у$ (паливна складова – 80% від собівартості, тобто $C_е = f(b_у)$ (грн/кВт·год). Питома витрата палива, тобто первинної енергії залежить від коефіцієнта корисної дії (ККД) ТЕС $\eta_с$ або енергоблоку $b_у = 123/\eta_с$, кг/кВт·год. ККД ТЕС, як складної технологічної системи залежить від ККД основних підсистем та елементів:

- котельні установки $\eta_{ку}$;
- трубопроводів $\eta_{тр}$;
- турбоустановки $\eta_{ту}$;
- електрогенератора $\eta_г$;
- витрати електроенергії на власні потреби $\alpha_{вп}$, тобто:

$$\eta_с = \eta_t \eta_{oi} \eta_м \eta_г \eta_{ту}\, \eta_{ку} (1 - \alpha_{вп}). \qquad (1.1)$$

На основі фізичної моделі ТЕС (рис. 1) з використанням методу декомпозиції, розроблено структурну схему декомпозиції техніко-економічних показників енергоблоків (рис. 2). Наведено декомпозицію питомої витрати умовного палива залежно від ККД ТЕС з вироблення електричної енергії $\eta_с$. ККД ТЕС залежить від ККД підсистем: котельня установка (КУ) – $\eta_к$; трубопроводи (ТР) – $\eta_{тр}$; турбоагрегату (ТА) – $\eta_{та}$, які у свою чергу залежить від витрат електроенергії на власні потреби $\alpha_{вп}$. Дана методика апробована на деяких ТЕС України і зокрема на Зміївській ТЕС, і продовжується її включення до автоматизованих систем управління енергоблоками (АСУ) та системи діагностування (АСУТП).

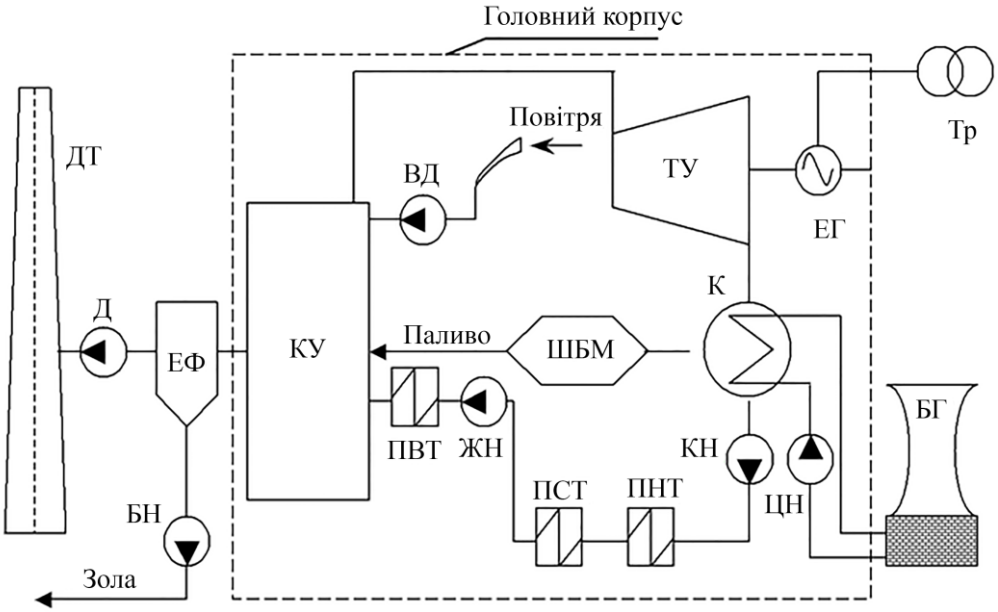
У таблиці 1 наведено деякі дані щодо витрати електроенергії на власні потреби КЕС залежно від потужності енергоблоків, початкових параметрів пари та виду палива.

Очевидна необхідність диференціація цього показника щодо окремих елементів, технологічної системи електростанції, тобто визначати ролі кожної підсистеми та кожного елемента в енергозбереженні (зниження витрати первинної енергії).

При дослідженні енергозбереження в енергетиці широко використовують метод еквівалентування, тобто заміни групи окремих споріднених елементів одним укрупненим еквівалентним. Еквівалентування широко застосовується при дослідженнях у теплоенергетиці – заміна груп конденсатних, живильних, мережевих та циркуляційних насосів одним (еквівалентним); паралельних груп підігрівачів – однією; паралельних ниток паропроводів тощо. Це дозволяє зменшити кількість математичних моделей та скоротити час досліджень. Однак при цьому еквівалентування призводить до зниження достовірності кінцевих результатів дослідження.

Використовуючи методи декомпозиції та еквівалентування, можна розробити структурні схеми формування показників ефективності (економічності, надійності тощо) для будь-якої технологічної схеми (системи) електричної станції в залежності від витрати первинної енергії.

Як приклад, можна розглянути технологічну схему енергоблоку ТЕС конденсаційного типу (рис. 1). Ця схема розроблена з використанням методу еквівалентування (тут групи КН, ЦН, ПВД, ШБМ, ВД та ін.) замінені одним елементом. Велику роль в енергозбереженні на ТЕС відіграє витрати електроенергії на привід насосів, вентиляторів тощо.



ДТ – димова труба; Д – димосос; ЕФ – електрофільтр; БН – багерний насос; КУ – котельня установка; ВД – вентилятор дуттьовий; ТУ – турбоустановка; ЕГ – електрогенератор; Тр – трансформатор; ШБМ – кульовий барабанний млин; ПВТ – підігрівач високого тиску; ПСТ – підігрівач середнього тиску; ПНТ – підігрівач низького тиску; КН – конденсатний насос; ЦН – циркуляційний насос; К – конденсатор; БГ – баштова градирня.

Рис. 1 – Принципова теплова схема ТЕС

Fig. 1 - Schematic thermal diagram of a TPP

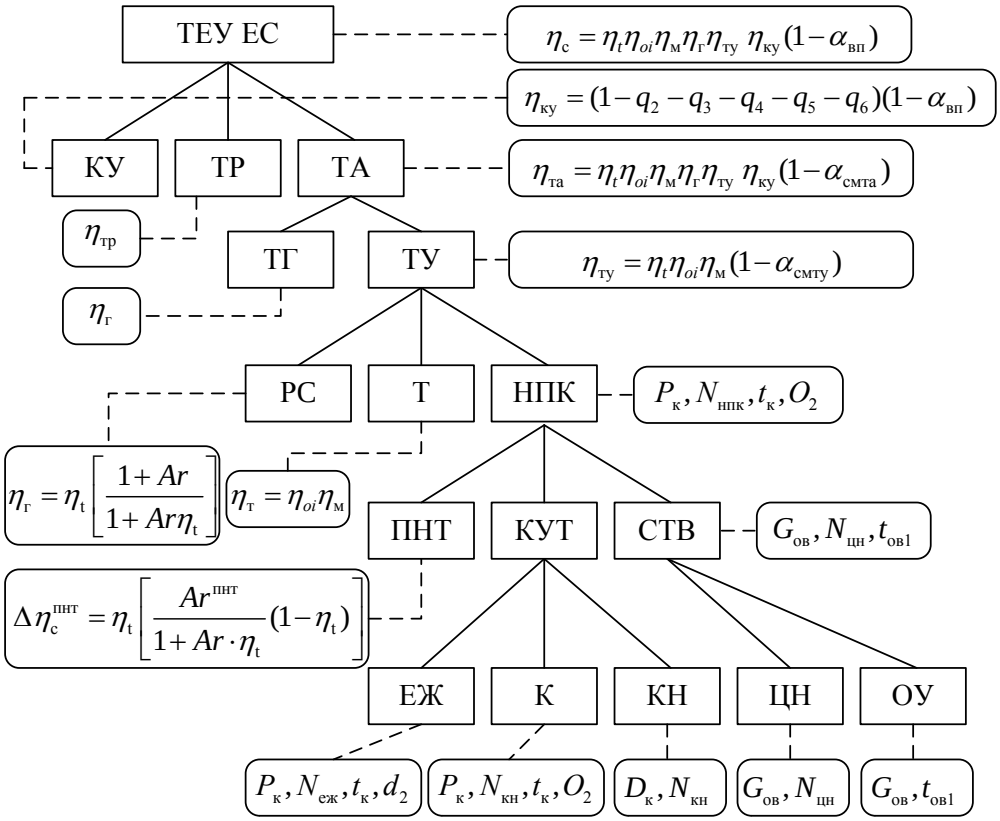


Рис. 2 – Структурна схема декомпозиції техніко-економічних показників енергоблоків ТЕС та АЕС

Fig. 2 - Structural diagram of the decomposition of technical and economic indicators of TPP and NPP power units

Таблиця 1

Витрата електроенергії на власні потреби енергоблоку КЕС, %

Table 1

Electricity consumption for the own needs of the KES power unit, %

№ з/п	$N_н$, МВт	P_0, МПа	Газ	Мазут	Тверде паливо
1	100	9,0	-	-	7,6
2	210	12,7	-	-	7,4-7,9
3	300	23,5	2,6-3,3	3,0-3,2	4,2-5,3
4	500	23,5	-	2,7-3,1	4,5-5,1
5	800	23,5	2,2-3,0	1,9-2,4	4,5-4,9
6	1200	23,5	-	2,1	-

2. Структура енергозбереження (економія ресурсів)

Більш докладно зупинимося на декомпозиції турбоагрегату, що складається з електричного турбогенератора (ТГ) та турбоустановки (ТУ). ККД залежить від економічності турбіни (Т) $\eta_т$ та системи низькопотенційного комплексу $E_{нпк}$. У свою чергу НПК включає до свого складу конденсаційну установку (КУТ), підігрівачі низького тиску (ПНТ) та системи технічного водопостачання (СТВ).

До складу КУТ входить конденсатор (К), конденсатні насоси (КН) та ежектори (ЕЖ); до СТВ входять циркуляційні насоси (ЦН) та охолоджувальні пристрої (ОУ).

Питома витрата електроенергії на потреби ТЕС залежить від типу електростанції (КЕС чи ТЕЦ), початкових параметрів пари, виду палива, типу системи технічного водопостачання та інших факторів.

Як видно з таблиці, збільшення потужності енергоблоків та початкових параметрів пари призводять до зниження витрат електроенергії на власні потреби КЕС. Витрата на власні потреби залежить від виду палива. Для блоків 300 МВт, під час переходу на мазут чи газ, знижується відповідно приблизно 1,53 і 1,61 раза. Для блоків 800 МВт – 1,80 і 2,18 раза.

Для ТЕЦ питома витрата електроенергії розраховується окремо на вироблення електроенергії та на тепло, що відпускається. Так, для ТЕЦ, оснащеної турбоустановками Т-110/120-130, з початковим тиском пари P_0=12,7 МПа, що працює на природному газі, питома витрата електроенергії складає: на вироблення електроенергії 3,5% і на відпустку тепла 3,5%.

Для ТЕЦ з турбоустановками ПТ-135/165-130 при P_0 = 12,7 МПа та роботі на вугіллі ці величини становлять, відповідно, 5,2% та 2,7%. Тобто сумарна витрата електроенергії на ТЕЦ становить ~ 7,0 %

Частка α_i окремих агрегатів та підсистем у витраті електроенергії на власні потреби для ТЕС коливається в широких межах (табл. 2).

На величину витрати електроенергії на власні потреби впливає економічність та навантаження енергоблоку. У таблиці 3 наведено витрати електроенергії на власні потреби в залежності від тиску в конденсаторі, питомих витратах палива та завантаження енергоблоків при роботі на кам'яному вугіллі.

Особливо істотні зміни питомих витрат електроенергії під час роботи у змінних режимах (при N_i/N<60%) для енергоблоків потужністю 160, 200 і 300 МВт, т.я. в даному діапазоні навантажень у роботі знаходяться живильні насоси з електропроводом.

З табл. 2 випливає, що найбільш суттєвими потребами власних потреб для КЕС з енергоблоками потужністю 160-200 МВт, що працюють на вугіллі є: живильні насоси, оснащені електроприводами; тягодуттьові установки; пилоприготування; циркуляційні насоси. Для КЕС з енергоблоками 300÷800 МВт, що працюють на мазуті, газі або їх комбінації – живильні насоси; тягодуттьові установки; циркуляційні насоси. Для ТЕЦ –живильні насоси, теплофікаційні насоси; тягодуттьові установки; циркуляційні насоси.

Таблиця 2

Частки α_i окремих підсистем від загальної витрати $\alpha_{вп}$

Table 2

Shares of individual subsystems in total cost

№ з/п	Елемент, підсистема	%
1	Живильні насоси	10-40
2	Тяга та дуття	20-35
3	Циркуляційні насоси	0-20
4	Теплофікаційні насоси	0-35
5	Пилоприготування	0-20

Таблиця 3

Витрати електроенергії на власні потреби

Table 3

Electricity consumption for own needs

Потужність блоку, МВт	Тиск $P_к$, КПа	Питома витрата палива, навантаження %, $\alpha_{вп}$, %					
		100,0		80,0		70,0	
300	3,50	330	3,8	336	4,1	340	4,3
500	3,74	328	4,3	333	4,7	340	4,9
800	3,50	324	3,7	331	4,0	336	4,1

У сучасній енергетиці істотну негативну роль у вирішенні проблем енерго- та ресурсозбереження на ТЕС за рахунок власних потреб відіграє відсутність методики визначення ефективності енергозберігаючих технологій в окремих системах, підсистемах та елементах технологічної схеми електростанцій та впливу їх на загальностанційні показники.

Якщо говорити тільки про енергозбереження, маючи на увазі економію електричної енергії на власні потреби ТЕС, то як критерій ефективності енергозбереження, може бути рекомендована питома величина економії енергії ($\Delta\bar{E}$), яка визначається за формулою:

$$\Delta\bar{E} = \frac{\Delta E}{E}, \qquad (2)$$

де: ΔE – економія електричної енергії в будь-якому з елементів схеми ТЕС, кВт·год; E – сумарне вироблення електроенергії енергоблоком, якому належить цей елемент, кВт·год.

Розроблено структурну схему енергозбереження при виробництві електроенергії на типовій ТЕС (рис. 3), яка дозволяє оцінювати ефективність енергозберігаючих технологій у будь-якій підсистемі та її елементах. Водночас вона дозволяє оцінювати взаємний вплив енергозберігаючих технологій у різних підсистемах та елементах ТЕС.

$\sum\Delta E_с$ – загальна економія енергоресурсів на ТЕС за рахунок власних потреб;

$\sum\Delta E_{ку}$, $\sum\Delta E_{ту}$, $\sum\Delta E_{ег}$ – економія енергоресурсів у котельній, турбінній установках та генераторі; $\Delta E_{рс}$, $\Delta E_т$, $\Delta E_{нпк}$ – економія енергоресурсів у регенеративній системі, турбіні та низькопотенційному комплексі; $\Delta E_{жн}$, $\Delta E_{рп}$, $\Delta E_{цн}$, $\Delta E_{кн}$, $\Delta E_к$ – економія енергоресурсів у живильних насосах, регенеративних та мережевих підігрівачах, циркуляційних та конденсатних насосах та конденсаторах парових турбін.

Зі схеми видно, що визначальною є енергозберігаюча технологія, впроваджена в одній із підсистем технологічної схеми ТЕС (котельної або турбінної установки, або при $+\Delta E_с$). При цьому необхідно врахувати: витрати, пов'язані з модернізацією регенеративної системи (РС) турбоустановки та термін окупності додаткових витрат; збільшення теплового забруднення навколишнього середовища, внаслідок збільшення температури газів.

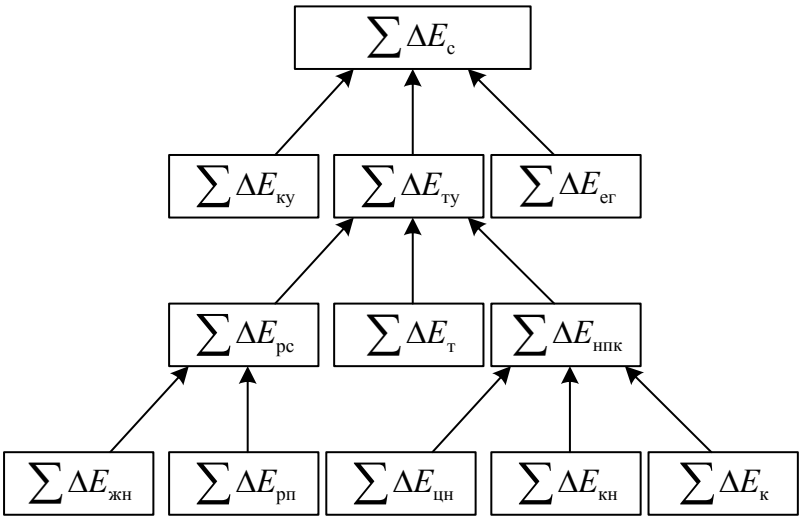


Рис. 3 – Структурна схема енергозбереження на ТЕС
Fig. 3 - Structural diagram of energy saving at a thermal power plant

У другому випадок енергозбереження досягається з допомогою режимного чинника (без модернізації). Витрати модернізації відсутні. Однак збільшення швидкості води призведе до підвищення інтенсивності стирання трубок, а отже до зниження надійності роботи конденсатора, НПК, ТУ і ТЕС в цілому. Одночасно з цим збільшиться викид теплоти в довкілля та збільшиться витрата природного ресурсу – води.

Очевидно, що оцінку ефективності енерго- та ресурсозберігаючих технологій, що впроваджуються, можна проводити шляхом порівняння річних наведених витрат на діючій ТЕС після впровадження нових технологій ($B_м$) з річними наведеними витратами на більш сучасній ТЕС ($B_н$) Оптимальному варіанту повинна відповідати умова: $B_м<B_н$. Витрати на ТЕС повинні враховувати як паливні, капітальні та експлуатаційні, так і екологічні та навіть соціально-економічні складові.

У випадках, коли впровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологій на ТЕС вимагає великих капітальних витрат (термінових кредитів або інвестицій), необхідно визначати термін їх окупності.

Наразі на ТЕС України практично вичерпано можливі впровадження енергозберігаючих, екологічно чистих та безпечних технологій за рахунок режимних факторів. У зв'язку з цим перспективними є енерготехнології, пов'язані з великими комплексними модернізаціями обладнання ТЕС.

Висновки

1. Наведена структурна схема декомпозиції техніко-економічних показників якості енергоблоків ТЕС та АЕС та структура енергозбереження.

2. В якості критерію ефективності енергозбереження може бути рекомендована питома величина економії енергії в будь-якому з елементів схеми ТЕС відносно сумарного вироблення електроенергії енергоблоком, якому належить цей елемент.

3. Оцінку ефективності енерго- та ресурсозберігаючих технологій можна проводити шляхом порівняння річних наведених витрат після впровадження нових технологій та витрат на більш сучасних ТЕС.

4. Розроблено структурну схему формування енергозбереження при виробництві електроенергії на електростанціях. Запропонована структура дозволяє оцінювати ефективність та взаємний вплив енергозберігаючих технологій у будь-якій підсистемі та її елементах.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Прецизійні системи автоматичного регулювання турбогенераторних установок / Г. І. Канюк, А. Ю. Мезеря, О. М. Близниченко, В. Є. Мельников, І. А. Бабенко // Енергозбереження, енергетика, енергоаудіт. – 2014. – № 11(130). – С. 12-27.
2. Чеботарьов А. М. Аналіз нормативного забезпечення ефективності роботи елементів систем низькопотенційних комплексів електростанцій / А. М. Чеботарьов, Ю. О. Бондаренко // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2022. – Вип. 29. – С. 97-103. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-97-103.
3. Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності обладнання котельних установок теплоелектростанцій шляхом підвищення якості вимірювань їх технологічних параметрів / Г. І. Канюк, Т. М. Фурсова, А. Ю. Мезеря, О. А. Долматов, С. О. Заїка, П. Р. Галинський // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2023. – Вип. 31. – С. 42-49. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-42-49
4. Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence / Qi Wang // Conference, 2023. International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS). – 2023. DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027
5. Пантєлєєва І. В. Реалізація задач розрахунків та аналізу техніко-економічних показників теплових електричних станцій / І. В. Пантєлєєва // Енергетика та Електротехніка. Наукові праці ВНТУ. – 2017. – № 4. – С. 1-6.
6. Alpeev A. S. Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants / A. S. Alpeev // Atomic Energy. – 2001. – № 90(2). – С. 109-112. DOI:10.1023/A:1011344806693
7. Коберник В. С. Техніко-економічні показники технологій теплової енергетики, що експлуатуються в маневрених режимах / В. С. Коберник // The Problems of General Energy. – 2021. – issue 3(66). – Pp. 36-42. DOI.org/10.15407/pge2021.03.036
8. Мезеря А. Ю. Дослідження показників якості спрощеної системи автоматичного регулювання мініГЕС / А. Ю. Мезеря, С. С. Придворов // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2024. – Вип. 33. – С. 78-91. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-78-91
9. Підвищення якості АСУ теплових електростанцій шляхом уточнення критерія оптимальності техніко-економічних показників / Г. С. Грінченко, Т. Ю. Василець, О. В. Купріянов, О. М. Близниченко, Т. М. Фурсова // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків, 2023. – Вип. 31. – С. 71-79. DOI 10.32820/2079-1747-2023-31-71-79
10. Любчик Л. М. Коррекция автоматизированного расчета технико-экономических показателей энергоблока / Л. М. Любчик, Г. Л. Гринберг // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск: Системний аналіз, управління та інформаційні технології : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2006. – Вип. 19. – С. 45-52.
11. Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність : нова енергетична стратегія України до 2035 року. – Режим доступу : https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf (дата звернення 23. 10. 2024)

Стаття надійшла для редакції 01. 11.2024 Стаття рекомендована до друку 03.12.2024

[1]**KANJUK G.,** D.Sc.,
Head of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail:genadiykanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1399-9039
[1]**MEZERYA A.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: mezzer@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2946-9593
[1] **VASILETS T.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: vasylecz.ty@uipa.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2148-8645
[1] **TSVETKOVA-KANYUK A.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: annacvetkovakanuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9059-4052
[1] **TOLSTOREBROV O.,**
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: oleksandrtolstorebrov@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0000-3203-8909
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

DECOMPOSITION OF TECHNICAL AND ECONOMIC QUALITY INDICATORS OF POWER PLANTS

The article presents a structural diagram of the decomposition of technical and economic indicators of the quality of power units of thermal and nuclear power plants and the structure of the formation of resource savings. It is shown that the specific value of energy saving in any of the elements of the power plant scheme relative to the total production of electricity by the power unit to which this element belongs can be recommended as a criterion of energy saving efficiency. Data on electricity consumption for the condensing power plant's own needs depending on the capacity of power units, initial parameters of steam, and type of fuel are given. It is stated that using the methods of equivalence and decomposition in the study of energy saving, it is possible to develop structural schemes for the formation of efficiency indicators (economical, reliability, etc.) for any technological scheme (system) of an electric station depending on the consumption of primary energy. A significant negative role in solving the problems of energy and resource conservation at thermal and nuclear power plants at the expense of own needs has been identified, which consists in the lack of a methodology for determining the effectiveness of energy-saving technologies in individual systems, subsystems and elements of the technological scheme of power plants and their impact on general plant technical and economic indicators. An analysis of the share of individual units and subsystems in electricity consumption for their own needs was carried out. The electricity consumption for own needs is shown depending on the load and parameters of the power unit. A structural scheme for the formation of savings in electricity production at a power plant has been developed, which allows for evaluating the efficiency and mutual influence of energy-saving technologies in any subsystem and its elements.

KEYWORDS: *technical and economic indicators, energy saving, efficiency, power plant.*

In cites: Kanjuk G., Mezerya A., Vasilets T., Tsvetkova-Kanyuk A., Tolstorebrov O., (2024). Ways of increase indicators of quality (heat economy) of power plants. *Engineering*, (34), 82-91. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-08 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Kanyuk, GI, Mezerya, AYu, Bliznichenko, OM, Melnikov, VYe & Babenko, IA 2014, ‘Precizijni sistemi avtomatichnogo regulyuvannya turbogeneratornih ustanovok’ [Precision automatic control systems for turbogenerator plants], *Energozberezhennya, energetika, energoaudit*, no 11(130), Pp. 12-27.
2. Chebotarov, AM & Bondarenko, YuO 2022, [Analysis of regulatory support for the efficiency of the system elements of low-potential power plant complexes.], Engineering, № 29, Pp. 97-103. DOI 10.32820/2079-1747-2022-29-97-103
3. Kanyuk, GI, Fursova, TM, Mezerya, AYu, Dolmatov, OA, Zayika, SO & Galinskij, PR 2023, [Increasing the Operational Reliability and Efficiency of Boiler Plant Equipment of Thermal Power Stations by Improving the

Quality of Measuring their Technological Parameters], Engineering, № 31, Pp. 42-49. https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-31-42-49

4. Wang, Qi 2023, 'Automatic Control System for Thermal Power Plants Based on Artificial Intelligence', *Conference: 2023 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)*, DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00027

5. Pantyelyeyeva, IV 2017, 'Realizaciya zadach rozrahunkiv ta analizu tehniko-ekonomichnih pokaznikiv teplovih elektrichnih stancij' [Implementation of tasks: calculation and analysis of technical and economic indicators of thermal power plants.], *Energetika ta Elektrotehnika. Naukovi praci VNTU*, no 4, Pp. 1-6.

6. Alpeev, AS 2001, 'Automated Control and Safety of Nuclear Power Plants', *Atomic Energy*, no 90(2), Pp. 109-112. DOI:10.1023/A:1011344806693

7. Kobernik, VS 2021, [Technical and economic indicators of thermal power technologies operated in maneuvering modes.], *The Problems of General Energy*, issue 3(66), Pp. 36-42. DOI: https://10.15407/pge2021.03.036

8. Mezerya, AYu & Pridvorov, SS 2024, ["Research of the quality indicators of the simplified automatic regulation system of a mini-HPP"], Engineering, iss. 33, Pp. 78-91. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2024-33-78-91

9. Grinchenko, GS, Vasilec, TYu, Kupriyanov, OV, Bliznichenko, OM & Fursova, TM 2023, [Improving the quality of ASC of thermal power plants by specifying the optimality criteria for technical and economic indicators.], Engineering, No 31, Pp.71-79. DOI: https://10.32820/2079-1747-2023-31-71-79

10. Lyubchik, LM & Grinberg, GL 2006, 'Korrekciya avtomatizirovannogo rascheta tehniko-ekonomicheskih pokazatelej energobloka' [Correction of the automated calculation of technical and economic indicators of the power unit.], *Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu «Harkivskij politehnichnij institut». Tematichnij vipusk: Sistemnij analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi*, iss. 19, Pp. 45-52.

11. *Bezpeka, energoefektivnist, konkurentospromozhnist : Nova energetichna strategiya Ukrayini do 2035 roku*, 2015, [Security, energy efficiency, competitiveness: New energy strategy of Ukraine until 2035, 2015.], viewed October 23, 2024https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-04/Energy%20Strategy.pdf

The article was received by the editors 11/01/2024
The article is recommended for printing 12/03/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-09
УДК 621.315.592.1

[1]BUDANOV PAVLO,
Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1542-9390
[1]KUPRIYANOV OLEKSANDR,
Doctor of technical sciences, professor
e-mail: oleksandr.kupriyanov@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0017-5751
[1]MELNYKOV VIACHESLAV,
Senior Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6427-6805
[1]KONONOV VOLODYMYR, doctor of technical sciences,
Professor of the Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: volodymyr.kononov@karazin.ua ORCID: http://orcid.org/0009-0005-0819-4668
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

QUALIMETRIC METHOD FOR ASSESSING QUANTITATIVE AND QUALITATIVE PARAMETERS OF A SOLAR CELL

The article considers the qualimetric method of evaluating a solar cell, which describes its main electrophysical characteristics and the processes that occur in it during the conversion of solar energy into electricity.

The dependence of the photovoltaic characteristics of a solar cell on various parameters is analyzed. It is shown that an increase in temperature leads to a decrease in the main characteristics of a solar cell, in particular the efficiency, short-circuit current, fill factor and other indicators that characterize the current-voltage characteristic. This decrease occurs due to changes in the electrophysical properties of the materials from which solar cells are made, as well as due to the influence of temperature changes in the material. A method for calculating the main electrophysical parameters, such as short-circuit current and open-circuit voltage, has been developed, which takes into account the detailed structure of the materials used to manufacture solar cells, which increases the accuracy of calculations of the output power and efficiency, and also increases the stability of the current-voltage characteristics of solar cells in real operating conditions. It is emphasized that an important aspect is the analysis of the impact of changes in lighting conditions, which have a significant effect on the conversion of solar energy. The models show how changes in the intensity and spectrum of lighting can change the behavior of a solar cell, in particular, affect the current and voltage under variable lighting conditions during the day or in conditions of unstable solar radiation. It is shown that existing approaches to modeling solar cells require further improvement, in particular, taking into account the structure of materials, temperature and lighting conditions, which will increase the accuracy of calculations and the stability of solar cell operation in real conditions.

KEYWORDS: *solar cell, qualimetric evaluation method, quality and quantity system, information and measurement system, control method, photovoltaic module*.

In cites: Budanov P., Kupriyanov O., Melnykov V., Kononov V. (2024). Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. *Engineering*, (34), 92-103. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-09

Statement of the problem

Solar energy is one of the most promising renewable energy sources. However, to maximize the use of all the capabilities of this energy source, it is necessary to develop photovoltaic technologies, which have great potential. Today, the main task of photovoltaics is to reduce the cost of electricity generated by solar cells (SC). To achieve this goal, it is necessary to increase the efficiency and reduce the cost of SC.

© Budanov P., Melnykov V., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Statement of the task

The aim of the article is to model the quantitative and qualitative parameters of a photovoltaic module for stabilization and accuracy of current-voltage characteristics using qualimetry models.

In accordance with the specified goal, the work solves the problem of modeling the quantitative and qualitative parameters of the photovoltaic module for stabilization and accuracy of the current-voltage characteristics of the photovoltaic module.

Presentation of the main study

Modeling of solar energy parameters is a key element for increasing its efficiency, reliability, and economic feasibility, which contributes to a wider practical application of photovoltaic modules.

The features of modeling quantitative and qualitative parameters of the SE are:

- design optimization, which helps to improve their design and materials to achieve maximum performance;
- improving efficiency by analyzing parameters such as: short-circuit current, open-circuit voltage and internal resistance;
- identification of defects in the production process and deviations from calculated values, which may signal the presence of contaminants;
- forecasting of performance, SC under the influence of various external factors (e.g. temperature, lighting level), which is important for their operation in real conditions;
- comparative analysis of different types of SC, allowing to explore their advantages and disadvantages and choose effective solutions for specific applications;
- adaptation to new materials;
- reducing production and operating costs, making solar energy more affordable and competitive;
- development of new technologies, allowing faster and more efficient conduct of experiments and analysis of their results;

The features of constructing current-voltage (I-V) characteristics of SE are:

- accurate prediction of SC parameters under different operating conditions, which is critically important for optimizing design and materials, and also directly affects output power and efficiency;
- detection of defects in materials and production technology, deviations from calculated values, which may signal problems such as insufficient photoconductivity or inefficient light absorption;
- taking into account the influence of external factors, such as temperature, lighting level and angle of incidence of sunlight, as well as forecasting the operation of solar power plants in real conditions, which is especially important for the design of solar power plants;
- conducting a comparative analysis of different types of solar cells (e.g., monocrystalline, polycrystalline, thin-film), which helps to determine the most effective solutions for specific conditions.

Using I-V models in a quality management system helps to set standards and conduct regular inspections, which helps to increase the reliability and durability of SC.

The work considered the relationship between the SE model and its key electrical characteristics. The SE model is a critically important tool for studying and optimizing electrical characteristics, such as: short-circuit current (I_{sc}), open-circuit voltage (U_{os}), internal resistance (R_{in} .), photocurrent (I_f) , output power (P_{out}), and efficiency (efficiency).

In works [1-3] the modeling of short-circuit current is considered. Short-circuit current is the maximum current that the SE can deliver under no-load conditions , i.e. at zero voltage. High short-circuit current indicates good optical properties of the SE material and efficient light absorption. Short-circuit current is an indicator of the ability of the SE to generate electricity and is directly related to the photocurrent. The SE model allows you to predict the short-circuit current based on the photocurrent generated by illumination. In mathematical models, such as the model of a single-type diode, the short-circuit current is

calculated as a function of solar radiation intensity and temperature.

When comparing theoretical values of short-circuit current with experimentally obtained data, discrepancies can be found that indicate defects in the SC material. If the actual short-circuit current is lower than expected, this may indicate the presence of contaminants on the semiconductor surface, which is confirmed by laboratory tests.

When comparing the same type of SE, the critical parameter is the diffusion length and surface passivation. In SE, with uniform generation, the short-circuit current can be written, according to expression (1):

$$I_{SC} = q \cdot G \left(L_n + L_p\right), \qquad (1)$$

where I_{sc} - short-circuit current; G - generation rate; q - electron charge; L_n and L_p - are the diffusion lengths of electrons and holes, respectively.

Although expression (1) uses some assumptions, it shows that the short-circuit current strongly depends on the generation rate and diffusion length.

The short-circuit current is determined by the number of photons absorbed by the semiconductor material SC. When a photon with sufficient energy interacts with the atoms of the material, it can knock an electron out of its orbit, creating an "electron-hole" pair. These free electrons and holes begin to move under the influence of the internal electric field created by the p - n junction, which ultimately leads to the occurrence of a current.

For silicon-based power supplies, the short-circuit current largely depends on:

- intensity of solar radiation (for example, the more solar energy falls on the element, the more photons interact with the material, and, accordingly, the higher short circuit current);
- the spectrum of solar radiation , different wavelengths of light interact with a semiconductor differently (for example, ultraviolet and visible radiation can generate more free carriers than infrared);
- temperature (for example, as the temperature increases, the number of thermally activated charge carriers increases, which can have both a positive and negative effect on short circuit current);

For prediction short-circuit current is calculated using various mathematical models, among which the most common are [3, 4]:

- model of a single-type diode , this model is based on the diode equation and allows you to calculate short-circuit current as a function of light intensity and temperature conditions;
- models based on numerical simulations that use numerical methods (e.g., the finite element method) and allow for the geometry of the solar cell to be taken into account.

Comparison of calculated values short-circuit current with experimentally obtained data, allows you to assess the accuracy of the models, and identify potential problems in the production process. For example, if the actual The short-circuit current is significantly lower than expected, this may indicate:

- surface contamination (e.g. dust, dirt or organic contaminants);
- incorrect manufacturing technology (for example, crystal structure defects or poor-quality materials);
- inefficient light supply (for example, incorrect installation angle of the photovoltaic module), which can lead to a decrease in the intensity of solar radiation on the surface of the solar cell.

The main factors that affect the value of the short-circuit current are:

- temperature fluctuations;
- the use of anti-reflective coatings , which can significantly increase short-circuit current due to reduced reflectivity of the SC and increased light absorption;
- the structure of the semiconductor layer (for example, the use of thin-film technologies can increase the short-circuit current by optimizing the conditions for the generation of charge carriers).

Models describing short-circuit current can be useful for assessing the long-term reliability of ESS. Predicting changes short-circuit current as a result of material degradation over time, allows the development of reliable photovoltaic modules, which is critical for ensuring their durability and high performance.

Short-circuit current is an important parameter that affects the overall efficiency of a solar power system. The solar power system model allows both to predict the short-circuit current and to identify the causes of possible deviations from the expected values. This makes the model an important tool for optimizing and increasing the efficiency of solar technologies.

Open circuit voltage (U_{oc}) is the maximum voltage that the SE can develop in the absence of load [5,6]. To predict the no-load voltage in SE models, the following parameters are used: temperature, internal resistance, illumination level,. In mathematical models based on thermodynamic principles, open circuit voltage, can be expressed in terms of temperature and light level according to expression (2):

$$U_{oc} = \frac{k \cdot T}{e} \ln \left(\frac{I_F}{I_0} + 1 \right), \qquad (2)$$

where U_{os} - open circuit voltage k - Boltzmann constant , T - absolute temperature, e - electron charge, I_F - photocurrent, A, I_0 - reverse diode saturation current **.**

In case of deviations of the open-circuit voltage from the calculated values, models can be used to analyze the causes of these deviations (for example, if the open-circuit voltage decreases with increasing temperature, this may indicate problems with the material).

The open circuit voltage is determined by the balance between the generation and recombination of charge carriers in the semiconductor material. When the SC is illuminated, the photon energy leads to the formation of electron-hole pairs. The internal electric field created by the pn junction promotes the separation of these pairs, directing electrons to the anode and holes to the cathode. In the absence of a load, carriers continue to be generated, but recombination also continues. The open-circuit voltage reaches its maximum value when the charge flows of the device are in equilibrium, that is, the rate of generation of charge carriers is equal to the rate of their recombination.

There are different models for calculating open circuit voltage , namely:

- thermodynamic models , which are based on the principles of thermodynamics and allow us to express open circuit voltage due to temperature and light level;

- models based on numerical simulations , which can take into account effects such as temperature gradients, inhomogeneities in the material structure and other factors affecting the open circuit voltage. These models can use finite element methods or other numerical techniques to simulate the behavior of the SE under different conditions.

Open circuit voltage depends on the following factors: temperature; illumination level ; surface condition . With increasing temperature the open circuit voltage decreases. This is due to increased recombination of charge carriers, which is associated with increased thermal energy. Such models help predict how a change in temperature will affect open circuit voltage. Increasing the lighting level increases open circuit voltage as the short circuit current increases. In conditions where the light level becomes excessively high, saturation effects may occur, which also need to be taken into account in the models. Contamination and defects on the surface of a semiconductor can reduce open circuit voltage. The presence of microcracks or contamination can lead to increased recombination, which will be seen when comparing experimental and calculated values.

Deviation analysis open circuit voltage from the calculated values , allows you to identify potential problems, namely:

- decrease open circuit voltage with increasing temperature may indicate that the material cannot withstand thermal loads;

- differences between experimental data and models may indicate the presence of defects in the structure or inefficiencies in the production technology.

Models describing the open-circuit voltage can be used to design more efficient SE, and can also be useful for predicting the durability of SEs. If the study shows that The open circuit voltage drops sharply under certain conditions, indicating the need for durability and reliability tests of the SC.

Open circuit voltage is an important indicator of the efficiency of the SE. Models describing open circuit voltage, allow not only to predict its value, but also to identify the causes of deviations, which is an important step towards optimizing solar technologies. This makes modeling Open circuit voltage is an important tool for researchers and manufacturers seeking to improve the efficiency and reliability of photovoltaic modules.

The internal resistance of a power supply is a key parameter that determines its performance, especially in real-world conditions when the elements are operating under load [7,8] . This parameter reflects the resistance that the current experiences when passing through the power supply, and it directly affects the output power and efficiency. Power supply models can include

the calculation of the internal resistance, which allows you to evaluate how this internal resistance affects the output power and efficiency. By measuring the voltage and current on the load, you can use a model to determine the internal resistance, which is important for optimizing the power supply parameters.

By analyzing data on internal resistance and its dependence on operating conditions, it is possible to predict how changes in temperature, humidity, and other factors may affect the performance of the SC (for example, an increase in the internal resistance of the SC may indicate material degradation, which can be corrected by improving production technologies).

The internal resistance of a SC can be defined as the ratio of the voltage change to the current change under the operating conditions of the element. It is important to consider that the internal resistance can vary depending on the environmental conditions and the state of the element itself.

Internal resistance is directly related to the output power of a power supply. When internal resistance increases, some of the output power is lost as heat, which leads to a decrease in the effective voltage and current at the output. This, in turn, reduces the overall efficiency of the system.

SC models can include the calculation of internal resistance based on parameters such as temperature, light level and material characteristics. Mathematical models can use open circuit voltage and short circuit current data to estimate internal resistance. When comparing theoretical values of internal resistance with experimentally obtained data, deviations can be detected that indicate problems in the design or production of the SE. Factors that affect internal resistance: temperature ; humidity ; degradation of materials .

With increasing temperature, the internal resistance of the SE increases. This is due to the increase in thermal vibrations of atoms in the semiconductor material, which causes a decrease in the mobility of charge carriers and, consequently, an increase in resistance.

High humidity can affect internal resistance, especially in conditions where moisture penetrates the structure of the SC. This can lead to corrosion of the connections and an increase in resistance.

Over time, SC materials can degrade, which also leads to an increase in internal resistance. In the event of increased recombination of charge carriers or the appearance of cracks in the semiconductor structure, the internal resistance can increase significantly.

Analysis of internal resistance data and its dependence on operating conditions allows us to predict how environmental changes will affect the performance of the SC. If the internal resistance increases sharply at a certain temperature, this may be an indicator that the element materials are not sufficiently resistant to thermal loads.

Understanding the impact of internal resistance on power output allows you to optimize your SC system. For example, if the analysis shows that high internal resistance reduces overall performance, you can consider opportunities to improve the manufacturing technology, such as:

- optimization of the design of the SC ;
- the use of new semiconductor materials with lower internal resistance, which can significantly increase the efficiency of solar cells.

Thus, internal resistance is an important parameter that significantly affects the performance of solar cells. Models that take into account internal resistance allow not only to estimate the current efficiency, but also to predict the impact of various factors on performance, which is critical for the development and optimization of solar technologies.

Photocurrent is the current generated by a semiconductor as a result of light absorption, which leads to the generation of free electrons and holes in the semiconductor material [9-11]. The photocurrent model, based on the principles of photovoltaics , allows the prediction of photocurrent based on the intensity of solar radiation and the spectrum of light. The models can take into account various parameters, such as the angle of incidence of light, which allows for a more accurate assessment of photocurrents under different conditions.

Comparing model and experimental photocurrent data helps to identify factors that affect the efficiency of the SC. For example, if the photocurrent is lower than expected, this may indicate problems with the optical properties of the material, which requires

additional analysis and correction of the models.

Photocurrent is defined according to expression (3), as the number of electric charges created per unit time under the influence of light:

$$I_F = \frac{E}{E_0}\left[I_{sc} + k_{I_{sc}}\left(T - T_0\right)\right] \quad (3)$$

where I_F - is the photocurrent, A, E - is the energy illuminance, W/m ^{2}, E $_0$ =1000 W/m ^{2} is the energy illuminance under standard conditions, I_{sc} - is the short-circuit current, A, k_{Isc} - is the temperature coefficient of the short-circuit current, T - is the absolute temperature, T_0 - is the current temperature.

The photocurrent is proportional to the intensity of solar radiation incident on the surface of the SC. It is important to note that the photocurrent may depend on the spectrum of solar radiation, since different materials respond differently to different wavelengths of light.

Modern solar cell models take into account the following factors that affect the photocurrent: solar radiation intensity; light spectrum; angle of incidence of light .

Models can use solar radiation data under different conditions, including different seasons and climate zones, allowing them to predict photocurrent values for specific conditions. Different semiconductor materials have different absorption spectra. Models can include information about the interaction of different wavelengths of light with the material, allowing for more accurate predictions of photocurrent.

As the angle of incidence changes, the effective area on which light falls changes, and therefore the number of photons absorbed. Models can take these changes into account to accurately calculate the photocurrent.

Comparing model-predicted photocurrent values with experimentally measured data plays an important role in optimizing solar cells.

Factors affecting SC efficiency: optical properties of the material; surface quality; temperature. If the measured photocurrent is lower than expected, this may indicate problems with the optical properties of the material, such as reflection or scattering of light. The presence of impurities or insufficient transparency of the upper layers can lead to losses of light energy.

Irregularities and defects on the surface of the SC can prevent normal light penetration. Examination of the surface using microscopy methods will help to identify such defects.

As the temperature increases, the effective carrier mobility decreases, which can lead to a decrease in the photocurrent. Models that take into account thermal effects allow for a more accurate prediction of this parameter.

The following factors can be identified that allow increasing the photocurrent: optimization of materials; development of anti-reflective coatings ; adaptive sun tracking systems.

Different materials interact with light differently, which allows for the development of new semiconductors that better absorb light over a wide range of wavelengths.

The use of special anti-reflective coatings reduces light reflection, which can significantly increase photocurrent. Models help predict how such coatings will affect the performance of SC.

Systems that automatically change the tilt angle of photovoltaic modules to optimally receive sunlight throughout the day can significantly increase photocurrent and power output.

Continuous monitoring of photocurrent under different operating conditions is also important for assessing the durability and reliability of SC. Collecting photocurrent data over time allows for the detection of potential problems such as material degradation or changes in the environment.

Thus, photocurrent is one of the key parameters determining the efficiency of solar cells. Models that take into account various factors affecting photocurrent play an important role in predicting the performance of solar systems.

In works [5-7], modeling of output power (P $_{out}$) was considered. The output power of a solar power system is the product of current and voltage, making it critical for assessing its overall efficiency. Maximum output power of a solar power system P $_{max}$ is determined according to expression (4):

$$P_{max} = U_{oc} \cdot I_{sc} \cdot F_Z \quad (4)$$

where P_{max} – maximum output power of the SC, I_{sc} - short-circuit current, U_{oc} - open-circuit voltage, F_Z - fill factor of the I-V characteristic of the SC.

models allow you to predict the output power depending on short-circuit current, open-circuit voltage, internal resistance, temperature changes, and illumination, which allows you to more accurately assess performance in real-world conditions.

Analysis of experimental power output data, combined with models, allows us to identify optimal operating conditions, as well as determine how improvements in materials or technologies can increase the efficiency of solar energy conversion.

Thus, the output power depends not only on the maximum current and voltage values, but also on the actual operating conditions of the element.

SC models can take into account the effect of the following external factors on the output power: temperature; illumination level. Temperature changes can affect the output power. Increasing temperature generally reduces open circuit voltage and, therefore, output power. Models that take into account thermodynamic effects allow us to predict how output power will change under different temperature conditions.

Different levels of solar radiation affect the short-circuit current and therefore the power output. Models that take into account the variation of light levels throughout the day and in different seasons allow for more accurate predictions of SC performance.

Comparison of model and experimental data on output power allows us to identify the optimal operating conditions for photovoltaic modules .

In Tab.1 ,Fig. 1 and Fig. 2 shows the results of modeling the dependence of the no-load voltage and photocurrent on the internal resistance of the SC.

Table 1.

Results of modeling the dependence of the no-load voltage and photocurrent on the internal resistance of the CE

R,Ом	U,B	I, mA
6,5	0,80	1240
22,7	2,72	1200
44,7	5,2	1165
110	9,85	891
230	12,81	560
252	12,86	510
274	12,9	470
340	13,07	382
477	13,2	280
922	13,6	150

From the graph in Fig. 1, it can be seen that the voltage increases from 0 to 13 V, upon reaching a resistance of 110 Ohms, the voltage stabilizes and increases to 14 V.

It can be seen from the graph in Fig. 2 that the photocurrent decreases with the increase of the internal resistance of the SE to the value of 922 Ohms.

Studying the effect of different materials on the output power helps to determine which semiconductor materials are most efficient and significantly increase the output power of the SC. Analysis of different design solutions, such as the use of multilayer SC or different types of anti-reflection coatings , can help in increasing the output power. A decrease in output power over a long service life may be a sign of degradation of the materials from which the SC is made.

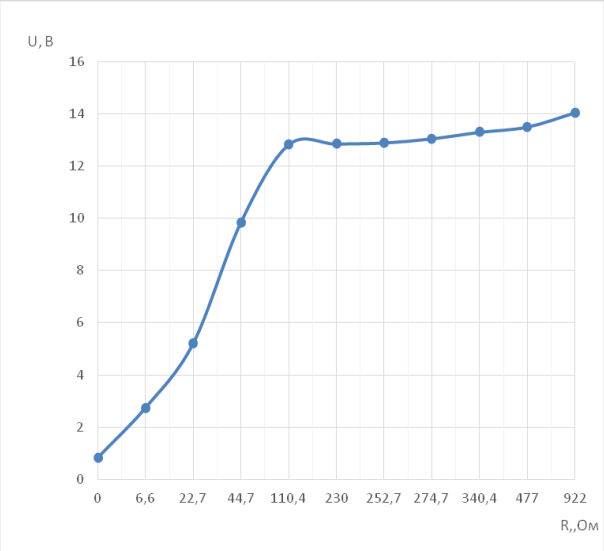


Fig. 1. - Graph of the change in the no-load voltage from the internal resistance of the CE

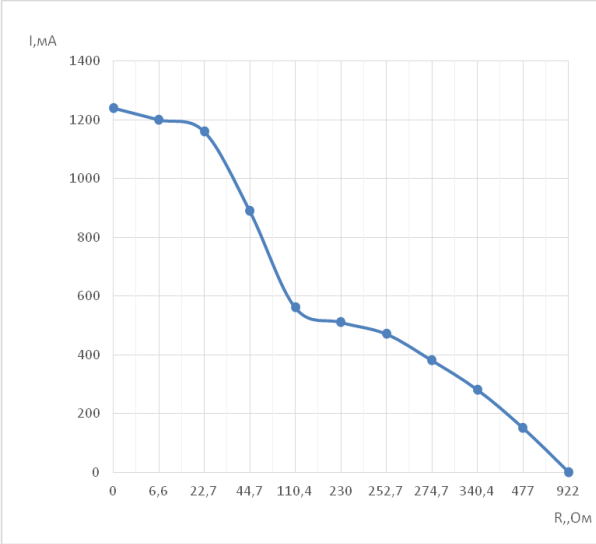


Fig.2 - Graph of the change of the photocurrent from the internal resistance of the CE

The dependence of output power on various factors has several practical applications. Optimizing output power allows designing photovoltaic modules with high efficiency through the use of sun tracking systems that change the angle of inclination of the panels to maximize sunlight reception.

Data on the output power of solar plants helps in the planning of power systems based on renewable energy sources. This is important for ensuring the reliability of power supply and load management.

Estimating output power allows investors and companies to make more informed decisions about investing in solar technologies, choosing those that have demonstrated high efficiency and reliability.

Modeling and experimental analysis allow for optimization of power output by providing a better understanding of the factors affecting solar PV performance, which contributes to the development of efficient solar technologies and systems for a sustainable energy future.

In works [5,6], the modeling of efficiency, which is an important characteristic that shows what fraction of solar energy the element converts into electrical energy, is considered. The efficiency is calculated, according to expression (5), as the ratio of the output power (P_{out}) to the power of solar radiation falling on the SE P_p.

$$\eta_{KPD} = \frac{P_{out}}{P_p} = \frac{I_m \cdot U_m}{P_p}, \qquad (5)$$

where η - is the efficiency of the SC, I_m and U_m – current and voltage corresponding to the point of maximum power P_{max}, P_p - the radiation power incident on the SC.

The SC model allows for the calculation of efficiency based on power output and illumination level. Optimization of the models based on experimental data allows for the prediction of how various changes in design and materials may affect efficiency. If the efficiency is lower than the calculated one, this may indicate the need to optimize the design, improve the quality of materials, or apply new technologies.

Thus, the SC model serves as an important tool for analyzing and optimizing its key characteristics, namely: short-circuit current, open-circuit voltage, internal resistance, photocurrent, output power and efficiency. The SC model allows not only to predict the behavior of the cell under different conditions, but also to identify potential problems, which is critical for improving the efficiency and reliability of solar systems.

High efficiency means that the element is able to efficiently use available solar radiation, making it more attractive from an economic point of view.

SC models allow us to calculate the efficiency based on the output power and the level of sunlight. It is important to note that the

efficiency depends on a number of factors: the type of materials, the temperature value ,

Different semiconductor materials have different absorption and recombination coefficients, which affect efficiency. Models that take into account material properties help predict how changes in design or the use of new technologies may affect efficiency.

Models that take into account thermodynamic effects can predict how the efficiency will change with temperature. As the temperature increases, the efficiency of charge carrier recombination can decrease, leading to a drop in efficiency. Comparing model and actual efficiency values allows us to identify directions for its increase. If the actual efficiency is lower than the calculated one, this may indicate the need to optimize the design of the element, for example, changing the thickness of the active layer or using special coatings to increase light absorption .

Improving the quality of semiconductors and other materials used can increase efficiency. Models that incorporate data on material quality can predict how their improvement might affect the efficiency of the SC.

The introduction of new technologies, such as perovskite solar cells or multilayer structures, can significantly improve efficiency. Models that take such technologies into account allow for the prediction of their impact on efficiency.

The value of efficiency is important for a number of practical tasks:

- Efficiency helps to select the most efficient technologies for use in solar systems, which is important for minimizing production and installation costs;
- the value of the efficiency of various solar energy systems helps to plan energy strategies, ensuring reliable and efficient use of solar energy;
- high efficiency makes solar technologies more attractive for investment, which can contribute to the development of the energy industry and lower prices for solar energy.

Efficiency is an important indicator of the effectiveness of solar energy. Efficiency modeling, combined with experimental data, allows identifying opportunities for optimization and improvement of technologies, which is critical for the further development of solar energy and increasing its competitiveness in the market.

Thus, the following results were obtained using models of quantitative and qualitative indicators of SE parameters:

- development and improvement of SC models, leading to a deeper understanding of the physical processes occurring in SC;
- modeling of solar energy parameters allows us to quantitatively assess how different conditions (temperature, illumination, angle of incidence of light) affect the main parameters (short-circuit current, open-circuit voltage, output power), which contributes to accurate prediction of the performance of photovoltaic modules in real operating conditions;
- SC models allow you to detect defects in materials or production technologies, which can be used to improve processes, reduce defects and improve the quality of photovoltaic modules ;
- scientific results obtained in the modeling process can be implemented in production, which leads to cost reduction and increased efficiency of production processes;
- modeling of SC, helps in research of new photoconductive materials, such as perovskites , which can lead to the creation of efficient SC with the best characteristics;
- SC models allow predicting the service life of SC, taking into account degradation factors, which may affect maintenance strategies and management of their installations;
- studying and optimizing efficiency through modeling helps reduce the cost of electricity production and increase the share of solar energy in the overall energy balance;
- SC models allow for rapid adaptation of existing technologies to new challenges and opportunities, providing an innovative approach to industry development.

The use of models of quantitative and qualitative indicators of solar energy parameters contributes to obtaining scientific results that increase the efficiency, quality, and reliability of solar technologies, which supports the development of sustainable energy solutions and promotes the transition to environmentally friendly energy sources.

Solar SC modeling helps optimize the design of photovoltaic modules , which increases their efficiency. This will allow for the efficient use of solar energy and reduce the costs of its production.

Research in photovoltaics is leading to the creation of new high-performance materials, such as perovskites or organic compounds. Models can help predict their behavior and characteristics.

Solar SC models can be adapted to predict the performance of solar PV systems in different climates, which will allow the development of more versatile solutions for solar systems. Solar PV models will provide a better understanding of how solar PV can work effectively in combination with other renewable energy sources, such as wind or hydropower, creating flexible power systems. Solar PV models can be used to predict the service life of solar PV and identify potential problems, which will ensure effective maintenance and management in information and measurement systems.

Models will allow you to create information and measuring systems that will automatically adapt the operation of solar installations depending on current conditions, increasing overall efficiency. Optimization of production processes using models will help reduce material costs, which will make solar technologies affordable. Modeling allows you to identify and eliminate weaknesses in the design and materials of solar energy systems, which leads to the creation of reliable and durable solar energy systems. The use of solar energy models in educational institutions contributes to the development of scientific research in the field of renewable energy sources and the formation of new specialists in this field.

Conclusions

CE models are an indispensable tool for scientists, engineers, and manufacturers seeking to create efficient and reliable solar technologies through the use of:

- taking into account external factors in the model, under various external conditions, such as: temperature, light level and humidity, which allows for accurate prediction of the performance of the solar energy system in real operating conditions;
- performance optimization, comparing theoretical values obtained from models with experimental data helps to identify deviations and determine the causes of their occurrence, which in turn contributes to the optimization of designs, materials and production technologies, and can also significantly increase output power and efficiency;
- predicting the degradation of the CE model, which is important for planning the operation and assessing the service life of photovoltaic modules .

Further development of SE models may include taking into account detailed characteristics of materials, in particular their electrophysical properties at different temperature regimes and operating conditions, which will significantly increase the accuracy of predicting the efficiency of SE operation in real conditions, taking into account not only general parameters, but also microstructural features of materials.

Thus, further development and improvement of SE models is an important step towards increasing the efficiency of solar energy in the context of global climate change and increasing demand for renewable energy sources. With the help of SE models, it is possible to achieve more accurate predictions of the generation of electrical energy by photovoltaic modules at solar stations, which will ensure economic benefits and environmental sustainability in the use of solar energy in the future.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Budanov, P., Kyrysov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Т. 3. – №. 8. – С. 75-80.

2. Rudenko, D.V., Vasyuchenko, P.V. Modeling of physical processes of operation of solar photovoltaic batteries. Academic notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadskyi. Series: Technical sciences. 2019. Volume 30(69). No. 2. P. 42–47.
3. Slabinoha M.O., Kuchirka Y.M., Krynytskyi O.S., Yurkiv N.M. Modeling the dependence of the change in the power of solar panels on the angle of incidence of rays // Methods and devices for quality control, No. 2(41). 2018. pp. 18–24.
4. Martyniuk V. I., Klen K. S., Zhuykov V. Ya. Determination of parameters of replacement schemes for solar panels using experimental data // Microsystems, electronics and acoustics, No. 26(2). 2021. pp. 1-9.
5. Moroz V. I.; Turych O. V. Computer modeling of solar batteries // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". Electrical power and electromechanical systems, No. 736. 2012. pp. 104-108.
6. Gaevskyi, O. Yu., Ivanchuk V. Yu. Modeling the volt-ampere characteristic of a photovoltaic module with variable ideality factor and reverse saturation current // Renewable Energy, No. 3(78). 2024. pp. 54-61.
7. Budzhak Ya.S., Erokhov V.Yu., Melnyk I.I. Forecasting and calculation of a photovoltaic converter with given characteristics // Eastern European Journal of Advanced Technologies. No. 4/8(52). 2011. pp. 24-29.
8. Kryvda V., Vasylenko O., Fedorova M. Modeling the electrical characteristics of a solar panel, Electrical Engineering and Computer Systems, No. 26(102). pp. 25-31. 2017.
9. Opanasyuk A. S., Kurbatov D. I., Berestyuk T. O., Dobrozhan O. A., Lopatka R. V. Modeling the main characteristics of solar cells based on n-ZnS/p-CdTe and n-CdS/p-CdTe heterojunctions // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies, No. 18. 2013. pp. 149–155.
10. Andronova O.V., Kurak V.V., Don N.L. Modeling the operation of photovoltaic panels using the MATLAB/Simulink environment // Bulletin of KhNTU No. 3(78). 2021. pp. 11-19.
11. Kurak V.V., Andronova O.V. Experimental determination of the solar radiation flux using the passport parameters of the photovoltaic converter module // Bulletin of KhNTU, No. 1(76). 2021. pp. 35-42.

The article was received by the editors 10/23/2024
The article is recommended for printing 12/02/2024

[1]П. Ф. БУДАНОВ,
доцент кафедри електротехніки та електроенергетики
e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1542-9390
[1]О. В. КУПРІЯНОВ,
доктор технічних наук, професор
e-mail: oleksandr.kupriyanov@karazin.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0017-5751
[1]В. Є. МЕЛЬНИКОВ,
старший викладач кафедри електротехніки та енергетики
e-mail: melnykov.viacheslav@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6427-6805
[1]В. Б. КОНОНОВ,
доктор технічних наук, професор кафедри електротехніки та електроенергетики
e-mail: volodymyr.kononov@karazin.ua ORCID: http://orcid.org/0009-0005-0819-4668
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

КВАЛІМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ДЛЯ ОЦІНКИ КІЛЬКІСНИХ ТА ЯКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА

У статті розглянуті кваліметричний метод оцінки сонячного елемента, що описує його основні електрофізичні характеристики та процеси, які відбуваються в ньому під час перетворення сонячної енергії на електричну.

Проаналізовано залежність фотоелектричних характеристик сонячного елемента в залежності від різних параметрів. Показано, що підвищення температури веде до зниження основних характеристик сонячного елемента, зокрема коефіцієнта корисної дії, струму короткого замикання, коефіцієнта заповнення та інших показників, що характеризують вольт-амперну характеристику. Це зниження відбувається через зміни в електрофізичних властивостях матеріалів, з яких виготовлені сонячні елементи, а також через вплив температурних змін в матеріалі. Розроблена методика розрахунків основних електрофізичних параметрів, таких як струм короткого замикання та напруга холостого ходу, яка враховує детальну структуру матеріалів, що використані для виготовлення сонячних елементів, що підвищує точність розрахунків вихідної потужності та коефіцієнта корисної дії, а також підвищує

стабільність вольт-амперних характеристик сонячних елементів у реальних умовах експлуатації. Акцентовано, що важливим аспектом є аналіз впливу змін умов освітленості, які мають значний ефект на перетворення сонячної енергії. Моделі показують, як зміни в інтенсивності та спектрі освітлення можуть змінювати поведінку сонячного елемента, зокрема впливати на струм та напругу при змінному освітленні впродовж дня або в умовах непостійного сонячного випромінювання. Показано, що наявні підходи до моделювання сонячних елементів потребують подальшого удосконалення, зокрема з урахуванням структури матеріалів, температурних і освітлювальних умов, що підвищить точність розрахунків та стабільність роботи сонячних елементів в реальних умовах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *сонячний елемент, кваліметричний метод оцінки, система якості і кількості, інформаційно-вимірювальна система, метод контролю, фотоелектричний модуль*.

Як цитувати: Budanov P., Kupriyanov O., Melnykov V., Kononov V. (2024). Qualimetric method for assessing quantitative and qualitative parameters of a solar cell. Машинобудування. 2024. Вип. 34 С. 92-103. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-09

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory / Budanov, P., Kyrysov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., Nosyk, A. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Т. 3, №. 8. – С. 75-80.
2. Руденко Д. В. Моделювання фізичних процесів роботи сонячних фотоелектричних батарей / Д. В. Руденко, П. В. Васюченко // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2019. – Т. 30(69), № 2. – С. 42–47.
3. Моделювання залежності зміни потужності сонячних панелей від кута падіння променів / М. О. Слабінога, Ю. М. Кучірка, О. С. Криницький, Н. М. Юрків // Методи та прилади контролю якості. – 2018. – № 2(41). – С. 18–24.
4. Мартинюк В. І. Визначення параметрів схем заміщення сонячних панелей за експериментальними даними / В. І. Мартинюк, К. С. Клен, В. Я. Жуйков // Мікросистеми, електроніка та акустика. – 2021. – № 26(2). – С. 1-9.
5. Мороз В. І. Комп'ютерне моделювання сонячних батарей / В. І. Мороз, О. В. Турич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2012. – № 736. – С. 104-108.
6. Гаєвський О. Ю. Моделювання вольт-амперної характеристики фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення / О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук // Відновлювана енергетика. – 2024. – № 3(78). – С. 54-61.
7. Буджак Я. С. Прогнозування і розрахунок фотоелектричного перетворювача із заданими характеристиками / Я. С. Буджак, В. Ю. Єрохов, І. І. Мельник // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2011. – № 4/8(52). – С. 24-29.
8. Кривда В. Моделювання електричних характеристик сонячної панелі / В. Кривда, О. Василенко, М. Федорова // Електротехніка та комп’ютерні системи. – 2017. – № 26(102). – С. 25-31.
9. Моделювання основних характеристик сонячних елементів на основі гетеропереходів n-ZnS/p-CdTe і n-CdS/p-CdTe / Опанасюк А. С., Курбатов Д. І., Берестюк Т. О., Доброжан О. А., Лопатка Р. В. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2013. – № 18. – С. 149–155.
10. Андронова О. В. Моделювання роботи фотоелектричних панелей з використанням середовища MATLAB/Simulink / О. В. Андронова, В. В. Курак, Н. Л. Дон // Вісник ХНТУ. – 2021. – № 3(78). – С. 11-19.
11. Курак В. В. Експериментальне визначення потоку сонячного випромінювання із застосуванням паспортних параметрів модуля фотоелектричних перетворювачів / В. В. Курак, О. В. Андронова // Вісник ХНТУ. – 2021. – № 1(76). – С. 35-42.

Стаття надійшла для редакції 23.10.2024 Стаття рекомендована до друку 02.12.2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-10
УДК 678.057.33

[1]**TRACHUK Y.,** Ph.D.,
student of Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: yehor.trachuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1802-2058
[1]**SHVED M.,** PhD in Technical Sciences,
associate professor of Department of Electrical Engineering and Power Engineering
e-mail: npchved46@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7725-1447
[1]*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*
39, Politekhnichna str., study 203, 03056 , Kyiv, Ukraine.

METHODS OF MIXING QUALITY CONTROL DURING POLYMER PROCESSING ON A DISK EXTRUDER

Today, the market dictates the need for extrusion systems capable of processing a wide range of different polymers with maximum efficiency. One of the options for such installations is a resource- and energy-saving cascade disk-gear extruder consisting of a metered-discharge disk extruder and a gear pump. The disk extruder is characterized by high mixing capacity and has proven itself as a melt-homogenizer. However, at present there is no unified methodology for selecting the technological parameters of the disk extrusion process depending on the quality of mixing of the material at the outlet, which greatly complicates the introduction of this equipment into the technological schemes of modern production facilities. Based on the analysis of recent scientific publications, a system of equations has been created that describes the movement of material in the disk gap and allows determining the residence time of the material and the length of the trajectory of material movement in the disk gap. Graphs of the dependence of the trajectory length and the duration of the material's stay in the disk gap on the distance to the moving disk are presented. Taking into account the previously obtained empirical data and using the correlation between the criterion of mixing quality and the value of the accumulated strain, a computer program was developed that is capable of selecting the technological parameters of disk extrusion depending on the required mixing quality. Based on the developed system of equations, graphs showing the dependence of the accumulated strain on the size of the disk gap and the rotation frequency of the working body were constructed. Depending on the required mixing quality and extruder performance, the program provides the values of the optimal size of the disk gap and the rotation speed of the working body, which greatly simplifies the process of setting up equipment for specific production conditions and types of materials.

KEYWORDS: *disk extruder, mixing quality control, accumulated shear strain.*

In cites: Trachuk Y. V. & Shved M. P. (2024). Methods of mixing quality control during polymer processing on a disk extruder. *Engineering*, (34), 104-115. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-10

Statement of the problem

Plastics are characterized by high efficiency in terms of technology, consumer and economic performance. Often, a polymer-based material is able to combine strength at the level of metals, low density, resistance to aggressive environments, low thermal conductivity and other important technological characteristics. As a result, plastics are effectively used in almost all industries, which is reflected in their widespread use and steady growth in production and processing volumes. [1 - 6].

Plastics, in addition to the polymer itself, also consist of fillers, dyes, stabilizers, and other special additives, the purpose of which is to ensure that the product obtains the required properties.

To expand the range of technological and operational properties, composite materials are becoming increasingly common. Their use makes it possible to produce polymeric materials with increased wear resistance, resistance to shock loads, etc. However, changes in the composition of the material being processed can have a strong impact on the technological properties, which in turn either makes it impossible to process the required composition on an existing single- or twin-screw extruder or worsens the quality of the finished product. This disadvantage is avoided by cascade extrusion units, in which

© Trachuk Y. V., Shved M. P., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

each operation is performed by a separate working body.[7] Among the developed schemes, a cascade extrusion unit, consisting of a metered-discharge disk extruder that serves as a melt-homogenizer and a gear pump used for dosing and pressure creation, stands out for its efficiency [8-13]. Despite the promise of this scheme, it is currently used to a limited extent due to the insufficient theoretical basis for its description.

As of today, no comprehensive methodology has been developed that would make it possible to select the technological parameters of the disk extrusion process depending on the quality of material mixing, which is a critical factor for the distribution and use of this device, since it serves not only as a melter but also as a mixer.

Analysis of recent studies and publications

The scientific principles of designing and calculating disk extruders were discussed in detail in [14]. The authors developed an algorithm for finding the geometry of the disk and its rotation frequency, which together provide a given final melt temperature at the outlet of the extruder. However, these algorithms do not take into account the required mixing quality of the resulting melt, which is definitely a disadvantage.

Existing methods for quantifying the mixing process are based on statistical analysis. The application of statistical criteria requires the study of real material samples, which is accompanied by their physical destruction, and does not allow predicting the result of mixing directly in the process of their manufacture. Therefore, the use of criteria that are non-statistical in nature, based on the determination of the strain accumulated by the melt, the temperature inhomogeneity of the melt, etc. is of particular importance. For example, the authors of [15] conducted a study to assess the mixing efficiency depending on the intensity of the supplied energy using statistical analysis methods and by scanning the melt temperature field across the channel with a multi-point mesh thermocouple installed at the outlet of the extruder. The results showed that the discrepancy in the assessment of mixing efficiency does not exceed 8%. However, the state of the material inside the extruder remains unknown.

The study of particle trajectories in the disk gap was described in [16 - 19]. The authors created programs capable of constructing material flow trajectories in a plane-plane and cone-cone gap, on the basis of which the effect of the size of the disk gap on the structure and properties of the extruded material was considered.

Statement of the task

The aim of this work is to develop equipment and an algorithm for its calculation that will allow to accurately and conveniently select the technological parameters of the disk extrusion process based on the correlation between the mixing quality criterion and the value of the accumulated strain. In order to achieve this goal, it is necessary to analyze the velocity fields and shear stresses that arise when the melt moves in the working gap of a disk extruder.

Presentation of the main study

The disk extruder works as follows. The polymer is dosed into the inlet 1 and transported by a multi-pass screw thread made on the side surface of the rotating disk 2 into the working gap 3 formed by the body and disk. Melting of the polymer and homogenization of the melt is carried out in the channels of the screw thread and in the gap, and the resulting melt exits through the hole 4. The main disadvantage of disk extruders is the low pressure at the outlet of the device (up to 1 MPa), so this type of device is effectively used with gear pumps as a dosing device [10 - 13]. Disk extruders are characterized by high efficiency in terms of both capital and operating costs, as well as a wide range of processed materials.

In cascade extrusion schemes, a disk extruder acts as a melter-homogenizer. The screw-cutting zone is responsible for melting 50-60% of the material, and the disk gap completes the transition of the material to a viscous-fluid state and homogenizes the resulting melt [14].

Existing methods for quantitatively describing the mixing process are based on

statistical analysis based on comparing the total dispersion with the actual value of the standard deviation of the concentration of the dispersed substance [7].

Currently developed methods for describing the mixing effect make it possible to estimate the average value of the shear strain per unit volume of the mixed material. Comparison of the calculated values of the shear strain with the experimentally determined statistical criteria of mixing quality indicates the existence of a correlation between them. The mixing quality criteria initially depend significantly on the shear strain, but then a kind of saturation occurs. Once this optimum value of shear strain is reached, further increases in shear strain do not affect the criteria. Thus, there is a certain optimal mixing duration. Obviously, if the system manages to realize the average shear strain, then the maximum possible homogeneity of the mixture is achieved for this apparatus and further increasing the duration of mixing to increase the homogeneity of the mixture is irrational. [7]. It is important to remember that with this method of estimating the shear strain, its optimal value will characterize only the mixing system for which the correlation was determined.

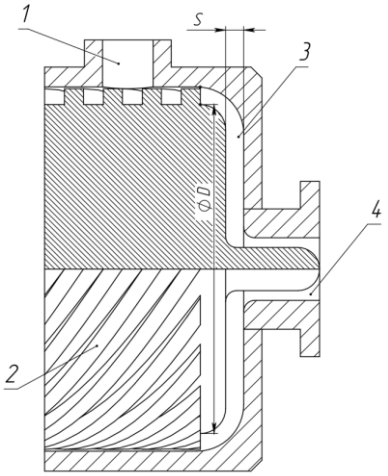


Fig. 1 - Schematic diagram of a disk extruder: 1 - inlet, 2 - screw thread, 3 - disk gap, 4 - outlet.

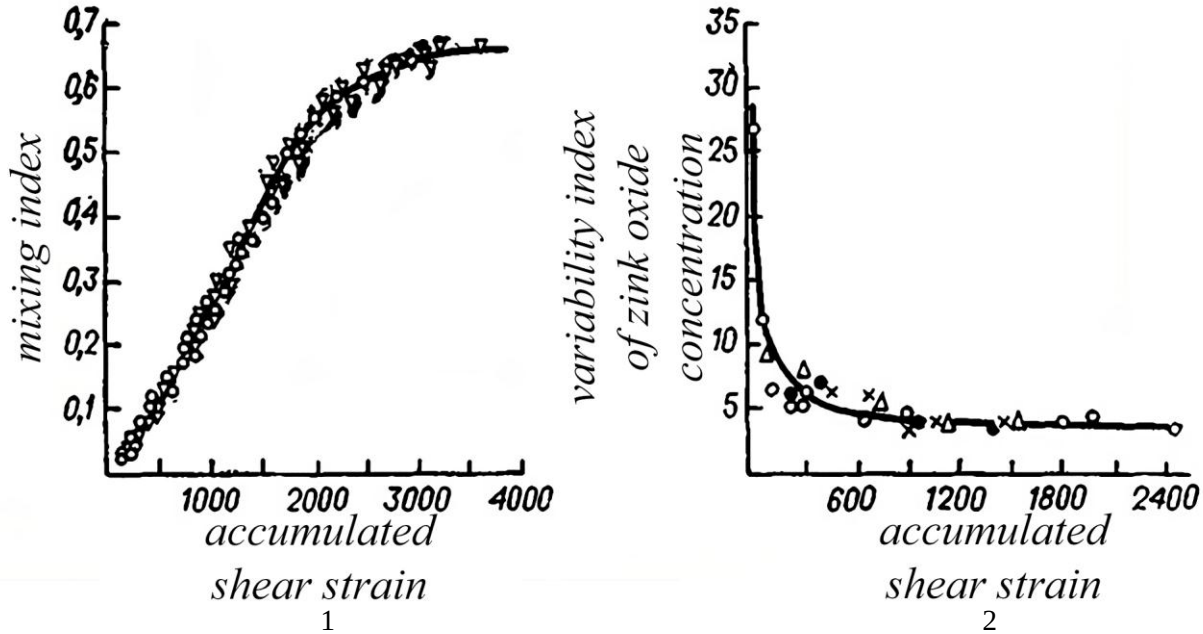


Fig. 2 - The effect of shear strain on the mixing index of polymer mixtures obtained using roller machines (1) and rotary mixers (2)

The total (accumulated by the mixture during the mixing process) shear strain $\dot{\gamma}_{summ}$ can be defined as the product of the average shear rate and the duration of mixing (shear duration) [7].

$$\gamma_{summ} = \bar{\dot{\gamma}} \cdot t \qquad (1)$$

where $\bar{\dot{\gamma}}$ is the average shear rate, s^{-1}; t is the mixing duration, s.

Metered-discharge disk extruders have the ability to adjust such parameters as the size of the disk gap and the rotational speed of the working body, which provides ample opportunities to control the mixing effect by changing both the value of the shear rate and its duration.

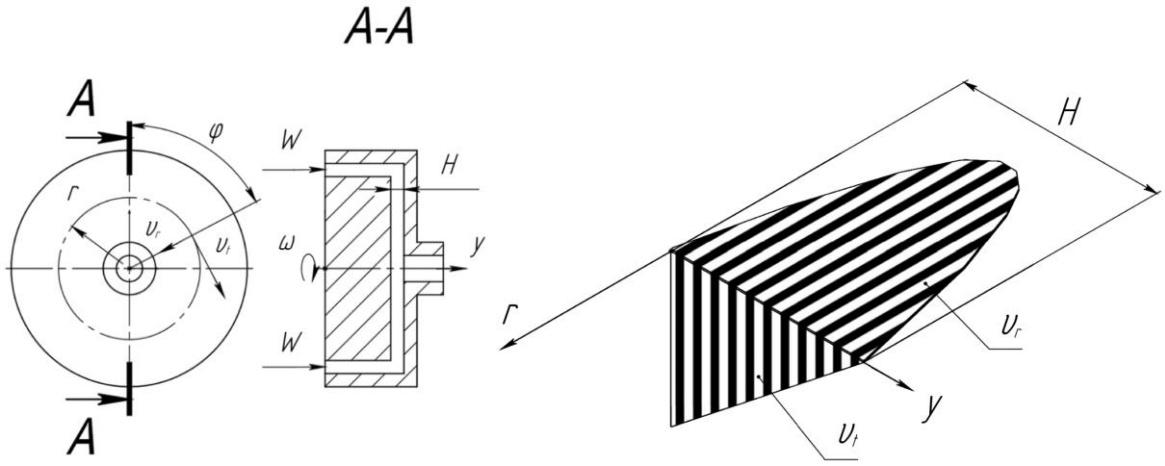
A prerequisite for determining the mixing effect of a disk extruder is the availability of information on the velocity distribution in the material flow.

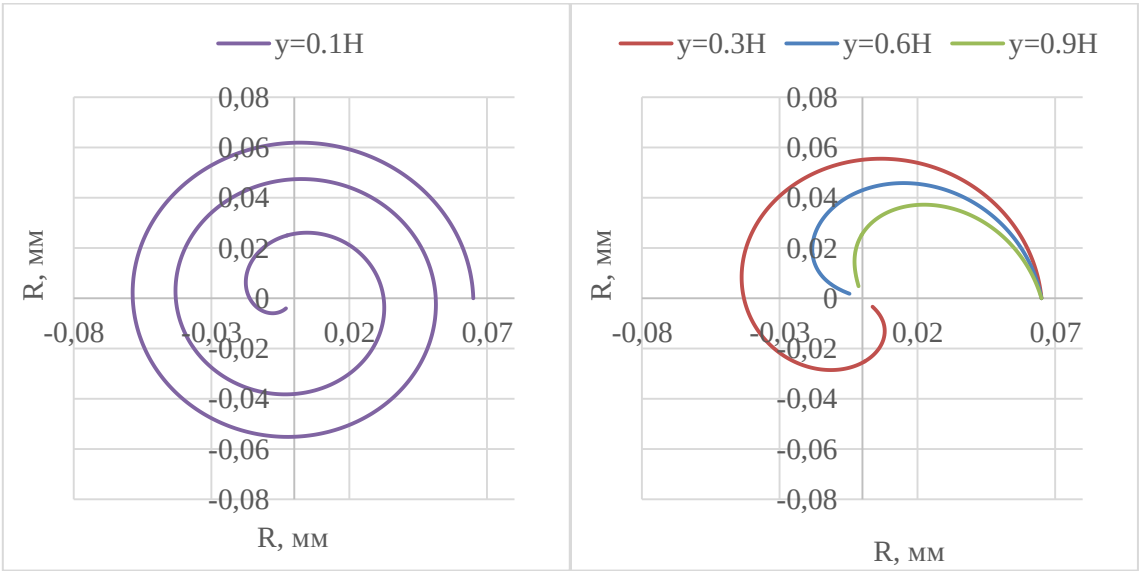
The nature of the polymer movement in the disk gap is determined by the result of the interaction of two mutually perpendicular velocities: radial and tangential. The profile of the radial velocity component has a linear profile, and the profile of the tangential component is parabolic.

$$\upsilon_t = V_t \frac{y}{H} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \cdot \frac{y}{H} \qquad (2)$$

$$\upsilon_r = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot H^3 \cdot r} \cdot y \cdot (H - y) \qquad (3)$$

As a result, the trajectories of the material in the disk gap take on a shape similar to Archimedes' spirals [16]-[19]. The trajectory depends on the volume capacity of the extruder, the distance of the cross-section from the moving disk, the disk rotation speed, and the size of the disk gap.





1) 2)

$R = 0,065 м$, $r = 0,005 м$, $W = 7,928 \cdot 10^{-6}\ м^3/c$, $H = 3 \cdot 10^{-3} м$, $n = 0,318$ c^{-1}.

Fig. 3 - Trajectories of particles in the slit gap of a worm-disk extruder: 1 – at $y = 0.1H$; 2 - at $y = 0.3H$ $y = 0.6H$ and $y = 0.9H$

Integrating the equations in the range from 0 to / and from R to r, we obtain:

$$r = \sqrt{R^2 - \frac{6 \cdot W \cdot y \cdot (H - y)}{\pi \cdot H^3} \cdot \Delta t} \quad (4)$$

The time spent by the element in the zone bounded by the radiuses R and r is equal to

$$\Delta t = \frac{(R^2 - r^2) \cdot \pi \cdot H^3}{6 \cdot W \cdot y \cdot (H - y)} \quad (5)$$

To determine the components of the shear rate, we differentiate the velocity equation along y:

$$\gamma_t = \frac{d\upsilon_t}{dy} = \left(V_t \frac{y}{H}\right) \frac{d}{dy} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{H} \quad (6)$$

$$\gamma_r = \frac{d\upsilon_r}{dy} = \left(\frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot H^3 \cdot r} \cdot y \cdot (H - y)\right) \frac{d}{dy} = \frac{3 \cdot Q}{\pi \cdot H^3 \cdot r} \cdot (H - 2 \cdot y) \quad (7)$$

Using the obtained equations to find the values of the components of the strain rate and the duration of their action, it is possible to determine the value of the total accumulated strain.

The total shear strain in the system can be found using the equation:

$$\gamma_{summ} = \gamma_x + \gamma_z = \sum_i |\dot{\gamma}_{xi}| \cdot \Delta t_i + \sum_i |\dot{\gamma}_{zi}| \cdot \Delta t_i \quad (8)$$

Based on the equations described above, a program was created that is capable of constructing material movement trajectories, calculating the length of this trajectory, determining the time the material stays in the disk zone, and calculating the shear strain γ_x, γ_z, and $\gamma_{сум}$ accumulated by the material not only in one section but in the entire disk gap. As a result, the following graphs of the distribution of the above characteristics over the width of the disk gap were obtained.

A nomogram was used as empirical data to determine the optimal operating parameters of a disk extruder. [20]

Table 1 shows the data obtained by substituting the experimentally determined parameters of the disk extruder into the system of equations described above.

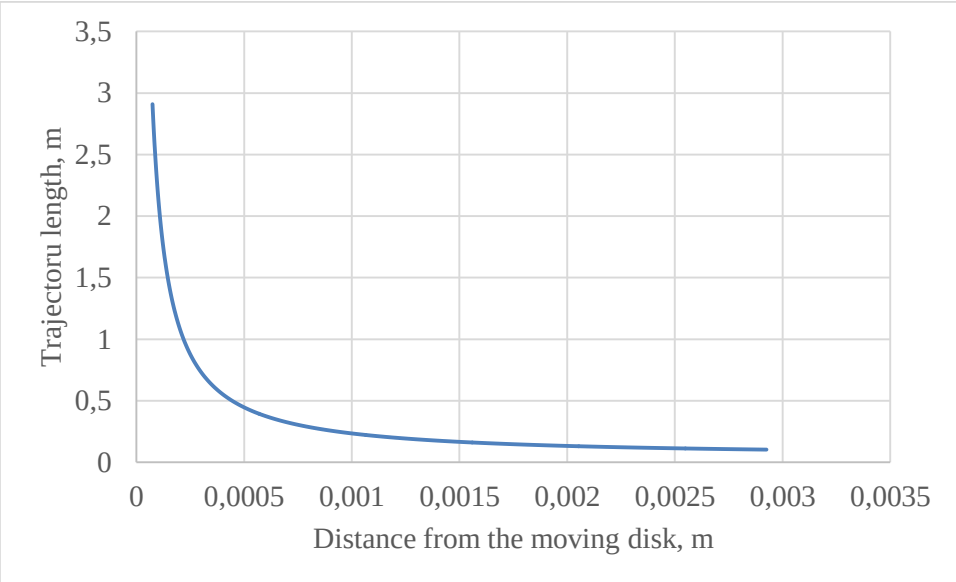


Fig. 4 - Graph of the dependence of the length of the particle trajectory on the distance from the moving disk when moving in the disk gap of a worm-disk extruder at $R = 0,065m$, $r = 0,005m$, $W = 7,928 \cdot 10^{-6}\ m^3/s$, $H = 3 \cdot 10^{-3} m$, $n = 0,318$ s^{-1}.

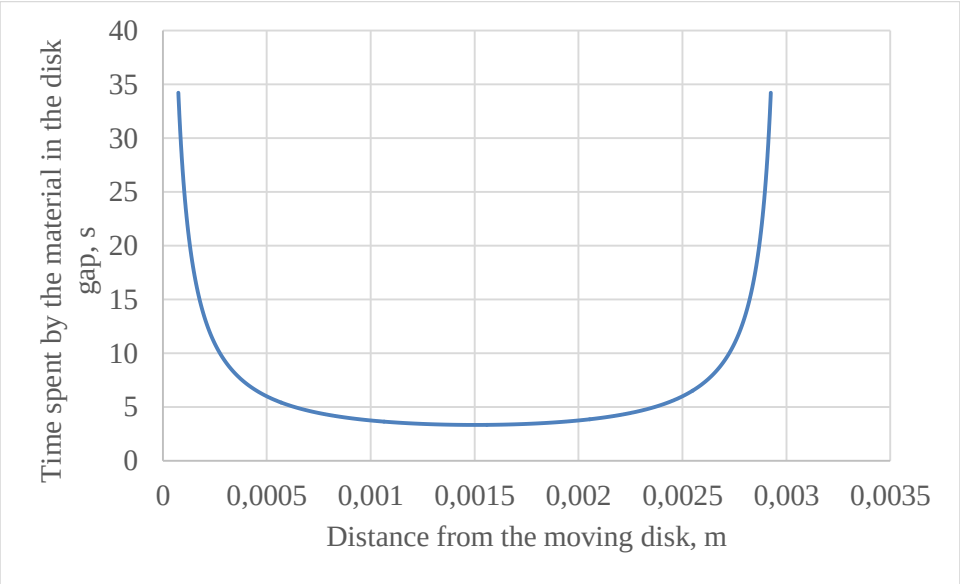


Fig. 5 - Graph of the dependence of the time spent by the material in the disk gap on the distance from the moving disk when moving in the disk gap of a worm-disk extruder at $R = 0,065m$, $r = 0,005m$, $W = 7,928 \cdot 10^{-6}\ m^3/s$, $H = 3 \cdot 10^{-3} m$, $n = 0,318$ s^{-1}.

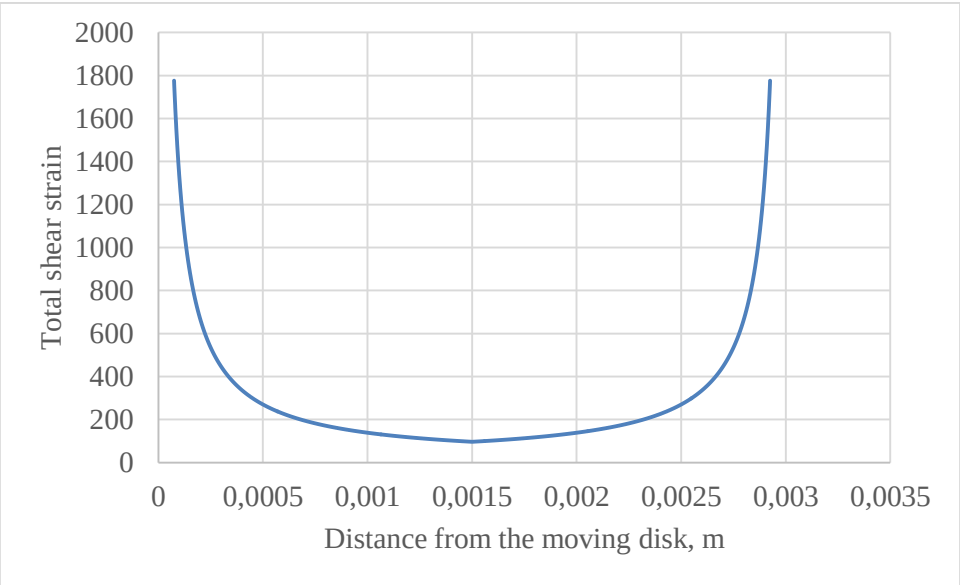


Fig. 6 - Graph of the dependence of the total shear strain on the distance from the moving disk at $R = 0,065m$, $r = 0,005m$, $W = 7,928 \cdot 10^{-6}\ m^3/s$, $H = 3 \cdot 10^{-3} m$, $n = 0,318$ s^{-1}.

.

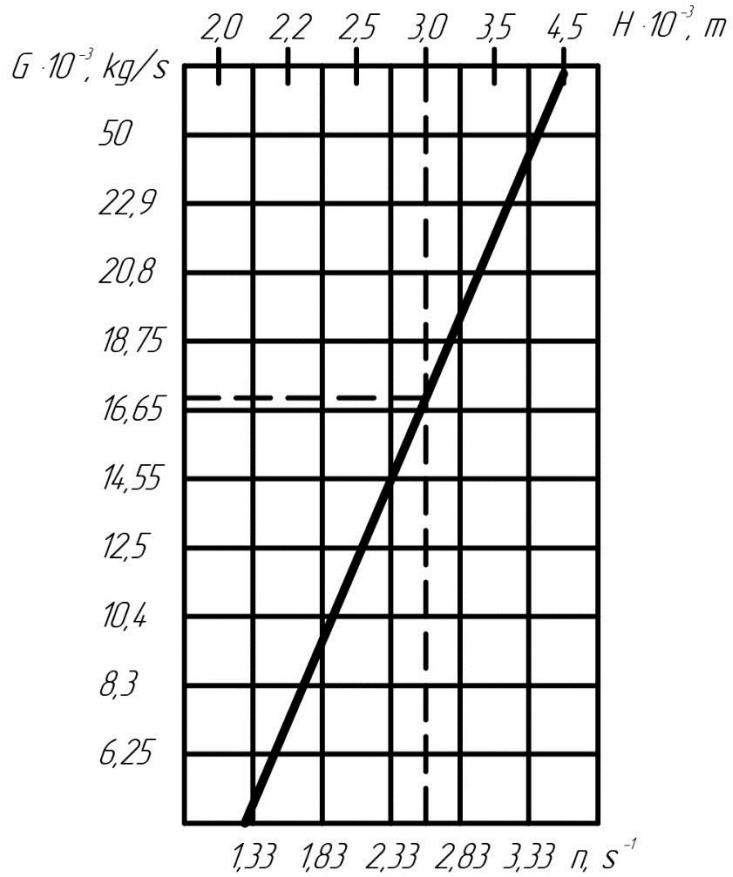


Fig. 7 - Nomogram for determining the optimal technological parameters of a two-gap disk extruder for processing LDPE of the 15802-020 brand.

Table 1

Values of accumulated shear strain at parameters determined by the nomogram

Таблиця 1

Значення накопиченої деформації зсуву при параметрах, визначених номограмою

Rotation frequency n, s^{-1}	Mass productivity G - 10^{-3}, kg/s	Gap between disks, $H \cdot 10^{-3}$, m	Accumulated shear strain γ_{summ}
2,33	14,55	2,80	1497
2,57	17,00	3,00	1429
2,80	18,75	3,19	1418
3,03	20,8	3,41	1392

At optimal technological parameters of the process, the calculated value of the accumulated strain is 1400-1500, so it is impractical to develop an accumulated shear strain in a disk extruder that does not belong to this range. Using the developed model for the parameters $R = 0,087m$, $r = 0,018m$, $W = 2,91 \cdot 10^{-5}\, m^3/s$, $n = 2,33$ s^{-1}, the values of the accumulated shear strain were calculated depending on the size of the disk gap and the rotation frequency. The graphs show that the rotation frequency of the working body has a greater influence on the value of the accumulated shear strain than the value of the disk gap.

Table 2

Dependence of the accumulated shear strain on the size of the gap between the disks.

Таблиця 2

Залежність накопиченої деформації зсуву від величини зазору між дисками.

Gap between disks, H, m	Accumulated shear strain γ_{summ}
0,002	1483
0,00225	1486
0,0025	1490
0,00275	1496
0,003	1502
0,00325	1508
0,0035	1514
0,00375	1521
0,004	1528
0,00425	1534

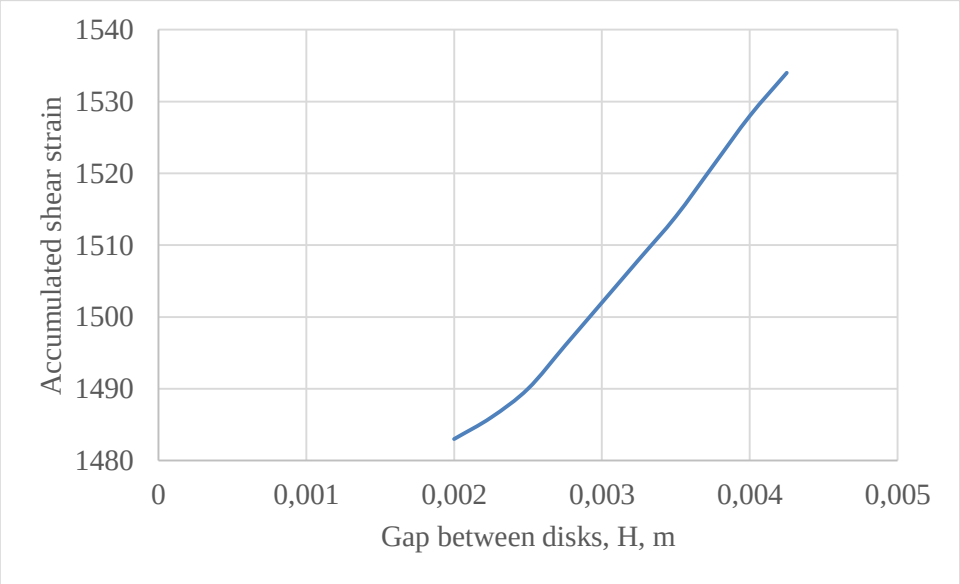


Fig. 8 - Graph of the accumulated shear strain versus the gap between the disks.

Table 3

Dependence of the accumulated shear strain on the rotational speed of the working body.

Таблиця 3

Залежність накопиченої деформації зсуву від швидкості обертання робочого органу.

Rotation frequency n, s^{-1}	Accumulated shear strain γ_{summ}
2	1315
2,25	1453
2,5	1591
2,75	1729
3	1867
3,25	2004

Rotation frequency n, s^{-1}	Accumulated shear strain γ_{summ}
3,5	2142
3,75	2280
4	2418

Conclusions

The movement of particles in the gap of a disk extruder is the result of two mutually perpendicular velocities. The flow from the outer diameter of the disk to the outlet is caused by the pressure created by the screw thread and has a parabolic profile. The flow tangent to the radius is caused by the rotation of the moving disk and has a linear profile. As a result, the flow trajectory has a complex shape similar to the Archimedes spiral and depends on the disk rotation speed, extruder performance, disk gap size, and the distance of the flow from the moving disk.

The effect of the distance from the moving disk on the trajectory length, the time spent by the material in the disk gap, and the amount of strain accumulated by the material is analyzed. Using the described model, the effective amount of accumulated shear strain is 1400-1500. It is determined that the disk rotation frequency has a greater influence on the amount of accumulated strain than the size of the disk gap.

The obtained mathematical model and system of equations makes it possible to accurately and in a more convenient form to select the technological parameters of the process based on the correlation between the criterion of mixing quality and the value of the accumulated strain.

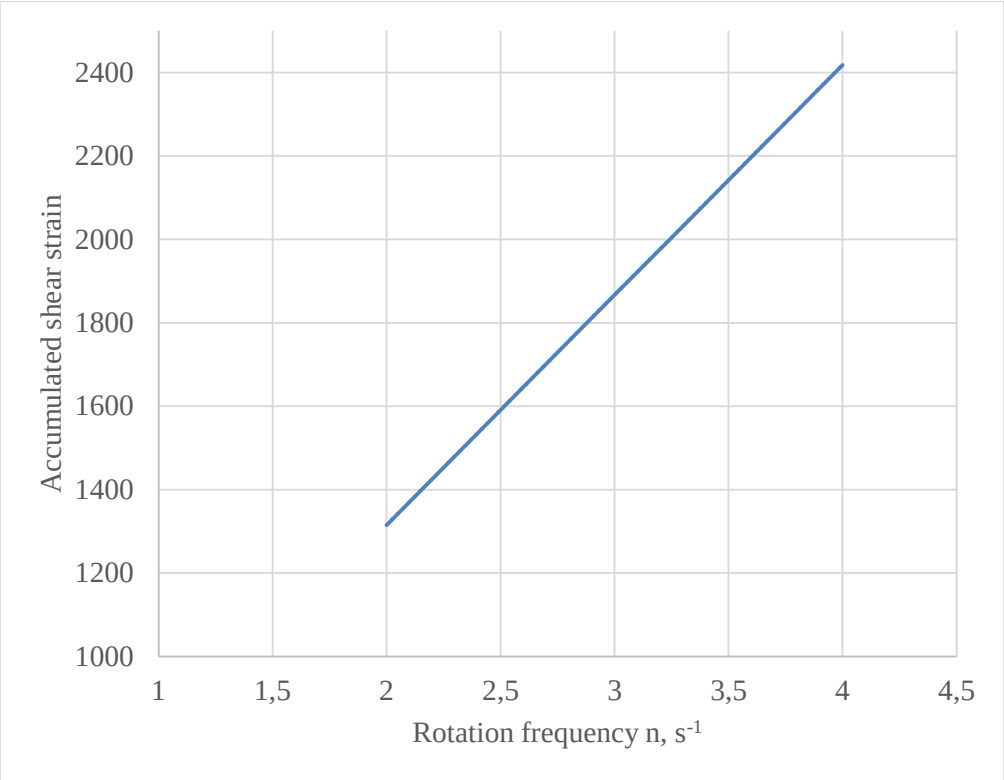


Fig. 9 - Graph of the dependence of the accumulated shear strain on the working body rotation frequency.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi.
2. Plastics Europe (2023) *Plastics – the fast Facts 2023*. Available at: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/ (Accessed: 29 September 2024).
3. Renewable Carbon News (2024). *New Market Analysis: Bio-based and Biodegradable Plastics Industries in China*. Available at: https://renewable-carbon.eu/news/new-market-analysis-bio-based-and-biodegradable-plastics-industries-in-china/ (Accessed: 29 September 2024).
4. American Chemistry Council (2023). U.S. *Plastics By The Numbers* Available at: https://www.americanchemistry.com/content/download/14802/file/U.S.-Plastics-By-The-Numbers-2023.pdf **(**Accessed: 29 September 2024).
5. Statista (2024) *Total plastics production in the United States from 2010 to 2023*. Available at: https://www.statista.com/statistics/203398/total-us-resin-production/ (Accessed: 29 September 2024).
6. European bioplastics (2020) *Bioplastics facts and figures*. Available at: https://www.scribd.com/document/457418595/M6-EUBP-Facts-and-figures?language_settings_changed=English (Accessed: 29 September 2024).
7. Mikulonok, I. O. (2020) *Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv* [Technological bases of processing of polymeric materials]. 2nd edn. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
8. Mikulonok, I. O., Murdid, N. V., Shved, D. M., Shved, M. P. (2009) 'Kaskadnyi dyskovo-shesterennyi ekstruder dlia pererobky polimernykh materialiv' [Cascade disk-gear extruder for processing polymeric materials], *Naukovi visti NTUU «KPI»* [KPI Science News], 2(64), pp. 74–77.
9. Shved, M. P., Shved, D. M., Keba, O.V. (2017) Vyznachennia dovzhyny zavantazhuvalno-plastykuvalnoi zony dyskovoho ekstrudera pry kaskadnii ekstruzii' [Determination of the length of the loading and plasticizing zone of a disk extruder during cascade extrusion], *Molodyi vchenyi* [Young Scientist], 3(43), pp. 772–775.
10. Shved, M. P., Shved, D. M., Velykoivanenko, S. P. (2018) Novyi resursoenerhooshchadnyi protses ekstruzii polimeriv ' [New resource- and energy-saving polymer extrusion process], *Molodyi vchenyi* [Young Scientist], 1(53), pp. 447–450.
11. Shved, M. P., Shved, D. M., Petrenko, O.V. (2012) Vykorystannia kaskadnykh skhem i dozuiuchykh shesterennykh nasosiv v ekstruzii polimeriv' [Use of cascade circuits and metering gear pumps in polymer extrusion], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut»* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"], 1(9), pp. 28–30.
12. Shved, M. P., Shved, D. M., Novodvorskyi, V. V., Kovba, A.M. (2019) Protses kaskadnoi dyskovo-shesterennoi ekstruzii ta yoho analiz ' [The process of cascade disk-gear extrusion and its analysis], *Ekolohichni nauky* [Ecological Sciences], 4(27), pp. 28–32. DOI: http://dx.doi.org/10.32846/2306-9716-2019-4-27-5
13. Shved, D. M (2017) *Protses ekstruzii polimeriv na kaskadnomu dyskovo-shesterennomu ekstruderi* [Polymer extrusion process on a cascade gear-disk extruder]. PhD thesis. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Available at: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19317 (Accessed: 01 October 2024).
14. Mikulonok, I. O., Radchenko, L. B. (2015) *Modeliuvannia dyskovykh ekstruderiv dlia pereroblennia polimernykh materialiv* [Modeling of disk extruders for processing polymeric materials] Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Available at: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37523 (Accessed: 02 October 2024).
15. Shved, M. P., Shved, D. M., Novodvorskyi, V. V. (2021) Otsiniuvannia yakosti rozplavu pry ekstruzii polimeriv [Evaluation of melt quality during polymer extrusion], *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho". Seriia: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia* [Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical engineering, ecology and resource saving»], 4(20), pp. 9–14. DOI: https://DOI.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248854
16. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2014). 'A Study on Polymer Particle Flow in a Disk Zone of a Screw-Disk Extruder'. *Chemical and Process Engineering*, 1(35), pp.121–135. DOI: http://dx.doi.org/10.2478/cpe-2014-0009
17. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2003). 'Simulation of polyethylene macromolecules shifting in a disc zone of an extruder'. *Polimery*, 1(49), pp.42–48. DOI: http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2004.042
18. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2015). 'Effective screw-disc extrustion in processing of recycled polymers and its composites'. In Vijay K. Thakur (ed.) *Recycled Polymers: Chemistry and Processing*. Shawbury: Smithers Rapra Technology Ltd, pp. 115–131.
19. Michalska-Pożoga, I., Diakun, J. (2014), The influence of the disc zone of a screw-disc extruder on the structure and properties of low-density polyethylene (PE-LD) extrudate, *Polimery*, 11-12(59), pp. 845–850. DOI: http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.845
20. Shved, N. P (1983) *Razrabotka protsessov ekstruzyy termoplastov na kaskadnykh ekstruderakh* [Development of thermoplastic extrusion processes on cascade extruders]. PhD thesis.

The article was received by the editors 10/03/2024
The article is recommended for printing 11/04/2024

[1]**Є. В. ТРАЧУК,** кандидат технічних наук,
студент кафедри електротехніки та енергетики
e-mail: yehor.trachuk@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0006-1802-2058
[1]**М. П. ШВЕД,** кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехніки та енергетики
e-mail: npchved46@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7725-1447
[1] *Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*
вул. Політехнічна 39, кім. 203, 03056 , Київ, Україна.

МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ ЯКОСТІ ЗМІШУВАННЯ ПРИ ПЕРЕРОБЦІ ПОЛІМЕРІВ НА ДИСКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

Станом на сьогодні ринок диктує потребу в екструзійних установках, здатних переробляти широкий спектр різноманітних полімерів з максимальною ефективністю. Одним з варіантів таких установок є ресурсо-енергоощадний каскадний дисково-шестеренний екструдер, що складається з дискового екструдера з дозованим живленням та шестеренного насоса. Дисковий екструдер відзначається високою змішувальною здатністю і добре зарекомендував себе як розплавлювач-гомогенізатор. Однак, на цей час не існує уніфікованої методики підбору технологічних параметрів процесу дискової екструзії залежно від якості змішування матеріалу на виході, що значно ускладнює впровадження даного обладнання в технологічні схеми сучасних виробництв. На основі аналізу останніх наукових публікацій створено систему рівнянь, яка описує рух матеріалу у дисковому зазорі і дозволяє визначити час перебування матеріалу, а також довжину траєкторії руху матеріалу у дисковому зазорі. Наведено графіки залежності довжини траєкторії та тривалості перебування матеріалу у дисковому зазорі від відстані до рухомого диска. З урахуванням раніше отриманих емпіричних даних та використовуючи кореляцію між критерієм якості змішування та величиною накопиченої деформації, було розроблено комп'ютерну програму здатну підібрати технологічні параметри дискової екструзії залежно від необхідної якості змішування. На основі розробленої системи рівнянь були побудовані графіки, що показують залежність величини накопиченої деформації від розміру дискового зазору та частоти обертання робочого органа. Залежно від необхідної якості змішування та продуктивності екструдера, програма надає значення оптимального розміру дискового зазору та частоти обертання робочого органа, що значно спрощує процес налаштування обладнання для конкретних виробничих умов та типів матеріалів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *дисковий екструдер, контроль якості змішування, величина накопиченої деформації зсуву.*

Як цитувати: Trachuk, Y. V. & Shved M. P. (2024). Methods of mixing quality control during polymer processing on a disk extruder. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 104-115. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-10

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список літератури:

1. United Nations Environment Programme. From Pollution to Solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi, 2021. 148 с.
2. Plastics – the fast Facts 2023. URL: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/ (дата звернення: 02.10.2024).
3. New Market Analysis: Bio-based and Biodegradable Plastics Industries in China. Renewable Carbon News. URL: https://renewable-carbon.eu/news/new-market-analysis-bio-based-and-biodegradable-plastics-industries-in-china/ (дата звернення: 02.10.2024).
4. American Chemistry Council. U.S. Plastics By The Numbers. URL: https://www.americanchemistry.com/content/download/14802/file/U.S.-Plastics-By-The-Numbers-2023.pdf (дата звернення: 02.10.2024).
5. Total plastics production in the United States from 2010 to 2023. Statista. URL: https://www.statista.com/statistics/203398/total-us-resin-production/ (дата звернення: 02.10.2024).
6. European bioplastics. Bioplastics facts and figures. URL: https://www.scribd.com/document/457418595/M6-EUBP-Facts-and-figures?language_settings_changed=English (дата звернення: 02.10.2024).

7. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. 2-ге вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084 (дата звернення: 02.10.2024).
8. І. О. Мікульонок, Н. В. Мурдід, Д. М. Швед, М. П. Швед. Каскадний дисково-шестеренний екструдер для переробки полімерних матеріалів. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2009. № 2. С. 74 – 77.
9. Швед М. П., Швед Д. М., Кеба О. В. Визначення довжини завантажувально-пластикувальної зони дискового екструдера при каскадній екструзії. *Молодий вчений.* 2017. 3(43). С 772–775.
10. Швед М. П., Швед Д. М., Великоіваненко С. П. Новий ресурсоенергоощадний процес екструзії полімерів. *Молодий вчений.* 2018. 1(53). С. 447–450.
11. Швед М. П., Швед Д. М., Петренко О. В. Використання каскадних схем і дозуючих шестеренних насосів в екструзії полімерів. *Вісник НТУУ «КПІ».* 2012. 1(9). С. 28–30.
12. Швед М. П., Швед Д. М., Новодворський В. В., Ковба А. М. Процес каскадної дисково-шестеренної екструзії та його аналіз. *Екологічні науки.* 2019. 4(27). С. 28–32. DOI: http://dx.doi.org/10.32846/2306-9716-2019-4-27-5 (дата звернення: 03.10.2024).
13. Швед, Д. М. Процес екструзії полімерів на каскадному дисково-шестеренному екструдері : дис. … канд. техн. наук : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / Швед Дмитро Миколайович. – Київ, 2017. – 148 с.
14. Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Моделювання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів: монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 103 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37523 (дата звернення: 03.10.2024).
15. Новодворський, В. В., Швед, М. П., & Швед, Д. М. Оцінювання якості розплаву при екструзії полімерів. *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження.* 2021. 4(20). С. 9–14. DOI: https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248854 (дата звернення: 03.10.2024).
16. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2014). 'A Study on Polymer Particle Flow in a Disk Zone of a Screw-Disk Extruder'. *Chemical and Process Engineering*, 1(35), pp.121–135. DOI: http://dx.doi.org/10.2478/cpe-2014-0009
17. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2003). 'Simulation of polyethylene macromolecules shifting in a disc zone of an extruder'. *Polimery*, 1(49), pp.42–48. DOI: http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2004.042
18. Rydzkowski, T., Michalska-Pożoga, I. (2015). 'Effective screw-disc extrustion in processing of recycled polymers and its composites'. In Vijay K. Thakur (ed.) *Recycled Polymers: Chemistry and Processing*. Shawbury: Smithers Rapra Technology Ltd, pp. 115–131.
19. Michalska-Pożoga, I., Diakun, J. (2014), The influence of the disc zone of a screw-disc extruder on the structure and properties of low-density polyethylene (PE-LD) extrudate, *Polimery*, 11-12(59), pp. 845–850. DOI: http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2014.845
20. Швед Н. П. Разработка процессов экструзии термопластов на каскадных экструдерах: дис. … канд. техн. наук : 05.17.08 – процессы и аппараты химической технологии / Швед Николай Петрович – Киев, 1983. – 165 с.

Стаття надійшла для редакції 03.10.2024 Стаття рекомендована до друку 04.11.2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-11
УДК 621.923

[1]**А.О. СКОРКІН,** кандидат технічних наук
доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання
e-mail: Andromeda862@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3032-8341
[1]**О.Л. КОНДРАТЮК,** кандидат технічних наук
доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання
e-mail: kondr20071@i.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3263-0483
[1]**В.О. СКОРКІНА,**
асистент кафедри машинобудування транспорту і зварювання
e-mail: Skorkinava@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0411-1047
[2]**В.В. СТАРЧЕНКО,**
аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування
e-mail: Vitalii.Starchenko@mit.khpi.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3495-4212
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.
[2]*Національний технічний університет " Харківський політехнічний інститут"*
вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ПЛОСКОГО ШЛІФУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАГАРТОВАНИХ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.

Шліфування є одним з основних методів механічної обробки, що визначають якість виготовлення деталей. Тому підвищення ефективності шліфування належать до пріоритетних завдань машинобудування.

Одним із різновидів підшипників кочення є кульковий або роликовий підшипник кочення для лінійного переміщення. Значні труднощі виникають під час обробки заготовок малої жорсткості напрямних лінійних підшипників. При закріпленні та обробці заготовок напрямних лінійних підшипників виникають пружні деформації. Розмір даних деформацій може перевищувати допуски на геометричні параметри обробленої поверхні. Після шліфування та зняття магнітного поля столу верстата, пружні деформації можуть повертати певну величину відхилення геометричним параметрам, які можуть перевищувати задані вимоги. Технологічні способи їх усунення значно збільшують час обробки та вартість операції.

При шліфуванні деталей малої жорсткості необхідно враховувати пружні деформації заготовки, що виникають від дії магнітного поля стола верстата та зусиль різання. Врахування пружних деформацій дозволить гарантовано досягти геометричну точність деталі, знизити тимчасові та вартісні витрати на обробку. однак, це питання при шліфуванні призматичних напрямних лінійних підшипників малої жорсткості з обмеженням пружних деформацій заготівлі при закріпленні та обробці досліджено недостатньо.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *інструмент, плоске шліфування, високошвидкісна обробка, обробний центр, легована сталь.*

Як цитувати: Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Скоркіна В. О., Старченко В. В. Особливості процесу плоского шліфування деталей із загартованих легованих сталей. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 116-124. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-11

Вступ

Сучасні технологічні процеси вимагають комплексного переміщення по трьох координатах з кількома осями обертання, що передбачає точне позиціювання з управлінням просторовим переміщенням, у тому числі лінійним. Вузли машин та механізмів, що забезпечують поступальний рух, називають лінійними напрямними, лінійними переміщеннями, системами лінійного

© Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Скоркіна В. О., Старченко В. В., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

переміщення, лінійними підшипниками, модулями лінійного переміщення.

Напрямні, що використовуються для здійснення лінійного переміщення рухомих вузлів різних машин або пристроїв, є одним з основних елементів конструкції, що визначає можливості та технічний рівень обладнання [1].

Найбільш широко в тепер використовуються напрямні кочення модульного типу, які складаються з профільних напрямних та кареток (рисунок 1). Каретки переміщаються по напрямних і цим реалізують необхідне переміщення. Дані напрямні мають ряд істотних переваг, що забезпечують їх широке поширення:

Високий рівень експлуатаційних характеристик;

не висока вартість;

відпрацьована та широко поширена технологія виробництва

Зараз розроблено безліч різних видів і серій лінійних підшипників для задоволення різноманітних потреб різних галузей промисловості. Лінійні підшипники випускаються в множині типів і розмірів. При їх виборі слід брати до уваги вимоги щодо навантаження, швидкості, ресурсу, жорсткості та точності, особливості конструкції обладнання та обмеження при встановленні.

За типом тіл кочення, що використовуються, лінійні підшипники можна розділити на дві групи: кулькові (рисунок 2, а) і роликові (рисунок 2, б).

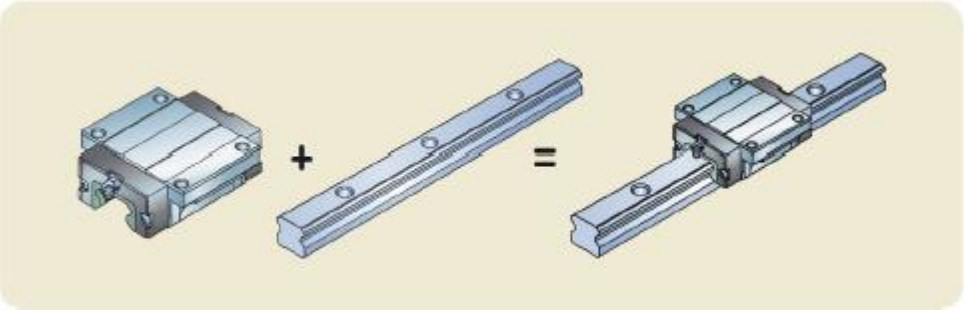


Рис. 1 - Лінійний підшипник модульного типу:
Fig. 1 - Modular type linear bearing

а

б

Рис. 2 - Кулькова (а) та роликова (б) профільні напрямні
Fig. 2 - Ball (a) and roller (b) profile guides

Роликові напрямні мають більш високу жорсткість і вантажопідйомність. Крім того, характеристики модульних напрямних значно залежать від кількості рядів тіл кочення і розташування тіл кочення. Використовується парна кількість рядів і варіюється в кількості від 2 до 6.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз досліджень закордонних вчених, таких як Klocke F., Brinksmeier E. та ін [2-10] дозволяє визначити основні методи механічної обробки загартованих легованих сталей. Ними є лезові процеси (точіння, фрезерування) та шліфування.

Всі методи дозволяють забезпечити необхідні вимоги до якості оброблених поверхонь. Порівняння методів у повній та наочній формі представлено в джерелі [6]. Для наочності пропонується діаграма (рисунок 3).

Чим далі будь-яка ознака від центру багатокутника, тим ця ознака краще для аналізованого процесу. Як випливає з представленого малюнка, шліфування вигідно відрізняється від лезових процесів за надійністю процесу, якістю шорсткості поверхні та точності форми. Сучасні прогресивні технології у шліфуванні дозволили підвищити швидкість знімання матеріалу та гнучкість процесу.

Супутні шліфування пластична деформація і робота тертя призводять до розігріву матеріалу заготовки в області контакту до високих температур. В результаті відбувається розм'якшення металу, що полегшує процес струж-коутворення.

Процеси, що відбуваються під час шліфування, відрізняються складністю. Для підвищення точності деталі, що виготовляється в умовах серійного виробництва при виготовленні особливо точних і відповідальних деталей, шлі-фування ведуть периферією кола при зворотно-поступальному переміщенні прямокутного столу.

Виходячи з вищеописаного, можна зробити висновок, що шліфування є значно більш складним процесом для теоретичного та експериментального дослідження, ніж фрезерування і точіння.

Рис. 3 - Порівняння можливостей лезових процесів обробки загартованих сталей та процесу шліфування
Fig. 3 - Comparison of the capabilities of blade processes for processing hardened steels and the grinding process

Постановка проблеми

Сукупність геометричних харак-теристик обробленої поверхні та фізико-механічні стани поверхневого шару деталі утворюють таке поняття, як «якість поверхні». Геометричні характеристики поверхні поділяють на мікрогеометрію та

макрогеометрію. Мікрогеометрія охоплює хвилястість, шорсткість і субшорсткість [4,5]. Причиною зміни фізико-механічних властивостей деталі є силовий і температурний вплив шліфувального кола на поверхню деталі в процесі обробки. Фізико-механічні властивості характеризуються мікротвердостями, залишковою напругою, хімічним складом, структурно-фазовим станом, припалами та мікротріщинами. Всі ці показники визначають втомну міцність, корозійну стійкість, зносостійкість та інші показники [3].

Основні підходи до моделювання механічної обробки при шліфуванні умовно можуть бути розділені на фізичні та емпіричні.

Фізичні поєднують аналітичні, звичайно-елементні, кінематичні, молекулярно-динамічні моделі.

Емпіричні поєднують регресійні, нейронні та моделі нечіткої логіки.

Для отримання топографії шліфувального кола використовують два методи. Перший метод полягає в безпосередньому скануванні різальної поверхні шліфувального кола. Другий вимагає застосування статистичного аналізу в результаті якого проводиться синтез топографії шліфувальних кіл.

Завдання контакту абразивного кола з оброблюваною поверхнею заготівлі дозволяють вирішувати кінематично - геометричні тривимірні моделі.

Вирішення аналогічних завдань може бути реалізовано за допомогою кінематично-емпіричного моделювання. Вихідні параметри в першому і другому випадку аналогічні. У першому випадку розглядається траєкторія руху між шліфувальним кругом і оброблюваною заготівлею, а в другому використовуються як аналітичні, так і емпіричні рівняння.

Кінематичні моделі описують багато параметрів процесу обробки шліфуванням, при цьому показують досить низький ступінь точності.

Метою роботи є дослідження процесу плоского шліфування заготовок малої жорсткості напрямних лінійних підшипників.

Виклад основного матеріалу

При шліфуванні поверхонь бічних граней призматичних заготовок малої жорсткості необхідно враховувати пружні деформації у напрямку перпендикулярної поверхні столу.

Розроблювана математична модель максимальних пружних деформацій заготовок заснована на теорії вигину балок, тому геометричні параметри заготовок повинні задовольняти обмеження: $l_з/h > 10$ (де $l_з$ - довжина заготовки, h - найбільший розмір поперечного перерізу заготовки).

Для дослідження пружних деформацій, що виникають при закріпленні та шліфуванні заготовки, обрана напрямна роликового однорядного підшипника ЛРХ 6/350 (Рисунок 4)

Напрямна підшипника виготовлена зі сталі 20Х (ГОСТ 4543 – 71). Відповідно до заводського технологічного процесу попередньо проводили відрізну операцію заготівлі, торцювали заготівлю в розмір 350 мм, проводили фрезерування призматичних граней. Далі проводили чорнове шліфування бічних граней (обробляючи одну з протилежних граней як чисто, іншу, знімаючи припуск t = 0,6 мм, радіальна подача Sp = 0,04 мм/х, швидкість подачі столу Vs = 20 м/хв), фрезерування площин призми та паза, шліфування площин призми, проводили центрувальну операцію двох отворів на торцях. Далі заготівлю цементували на глибину 1,6 - 1,8 мм, проводили рихтовку на пресі (відхилення від площинності - 0,1 мм), чорнове шліфування бокових граней (припуск на обробку t = 0,2 мм, радіальна подача Sp = 0,02 мм/х, швидкість подачі столу Vs = 20 м/хв, свердління отворів кріплення, нарізання різьби в отворах для кріплення напрямної та центрувальних отворах. ,1 мм) Потім виконували чорнове шліфування всіх граней при максимальній силі притягання магнітного поля столу верстата (припуск на обробку t = 0,4 мм, радіальна подача Sp = 0,02 мм/х, швидкість подачі стола Vs = 20 м/хв, розмір поперечного перерізу в результаті обробки - 15,2 х 16,6).

Відхилення від площинності має виражені хвилі макровідхилень (Рисунок 5).

Загальна похибка серії вимірювань для незалежних параметрів визначається:

$$\delta = \sqrt{\delta_{\text{ст}}^2 + \delta_{\text{і.г}}^2 + \delta_{\text{столу}}^2}$$

де δст – статистична похибка,
δі.г. = ±0,75 мкм похибка індикаторної головки,
δ столу - допуск площинності столу верстата = 3,5 мкм на довжині заготівлі (ГОСТ 16528-87).

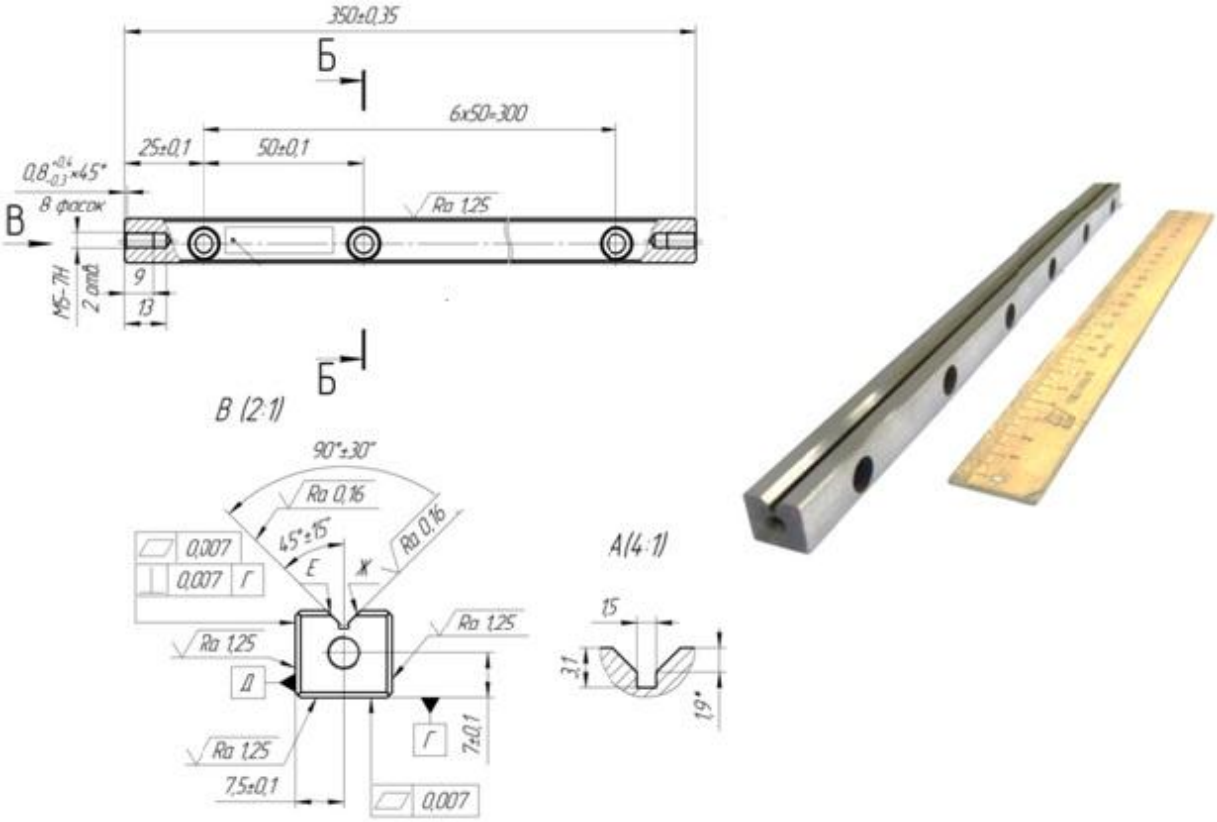


Рис. 4 - Досліджувана напрямна підшипника
Fig. 4 – Bearing guide under investigation

Для перевірки однорідності середньоквадратичних відхилень (вибіркових дисперсій) використовують критерій Кохрена. Для цього складається відношення максимальної дисперсії до суми всіх дисперсій:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^{N} S_i^2}$$

Кількість паралельних вимірів – 3 (по ширині заготівлі), кількість дослідів однієї заготовки -15.

Порівняння дисперсій 3-х паралельних вимірювань у 15 перерізах за критерієм Кохрена показали, що у всіх випадках дисперсії відрізняються незначно.

Результати вимірювань усередненої, з п'яти виміряних, заготівлі представлені рисунку 5.

При подальших дослідженнях заготовку поклали на поверхню столу верстата гранню А, при цьому заготівля стосується поверхні столу найбільш поверхнями, що виступають (рисунок 6). Для більш точного визначення положення виступаючих поверхонь заготовки та характерної довжини хвилі l на ділянках з найбільш виступаючими поверхнями заготівлі вимірювання виробляли з кроком 1 мм.

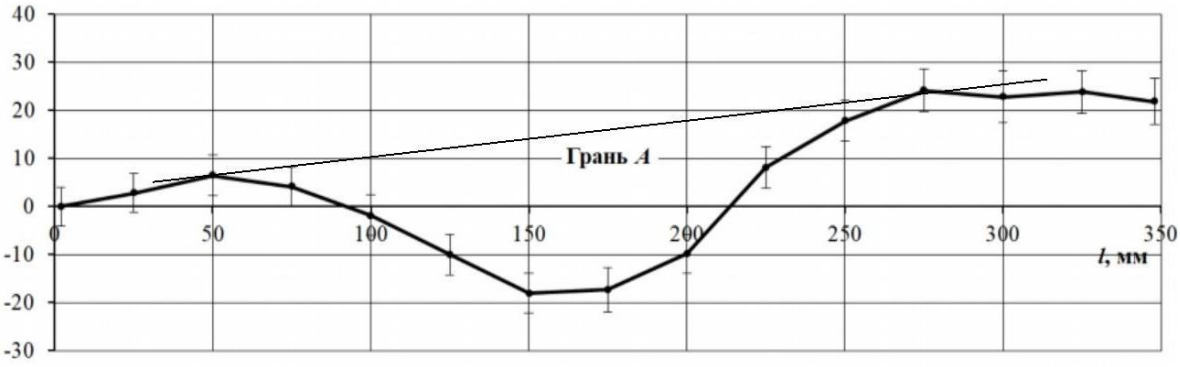


Рис. 5 - Відхилення усередненої поверхні заготовки (грань А)
Fig. 5 – Deviation of the averaged workpiece surface (face A)

В результаті досліджень встановлено, що визначальним фактором виникнення початкових відхилень від площинності бічних граней призматичних заготовок, є деформація заготовки в процесі її термообробки і попередніх шліфувальних операцій механічної обробки. Внаслідок чого заготівля отримує вигнутість поверхні з вираженими регулярними хвилями макровідхилень. Макровідхилення поверхні заготовки, що стикається з поверхнею столу верстата, моделюється циліндричною поверхнею з спрямовуючою у вигляді синусоїди з характерною довжиною хвилі l (рисунок 7). Довжина l залежить від ряду факторів, до яких належать: конструктивні особливості, згинальна жорсткість заготівлі, види термічної та механічної обробки, що передують операції шліфування. Подвоєна амплітуда синусоїди уа приймається рівною максимальній висоті хвиль макровідхилень (див. рис. 7).

У робочих умовах певна частина контактної деформації може бути пластичною. Величина останньої враховується тільки для зменшення зазору між поверхнями столу, що стикаються, і заготовки.

Призматична напрямна моделюється нерозрізною балкою, навантаженою рівномірно розподіленою по центральній осі навантаженням інтенсивністю $q = q_c + q_m$ (від дії зусилля тяжіння магнітного поля столу верстата q_c і маси заготовки qm) і зосередженої сили Py - радіальної складової сили різання (рисунок 7).

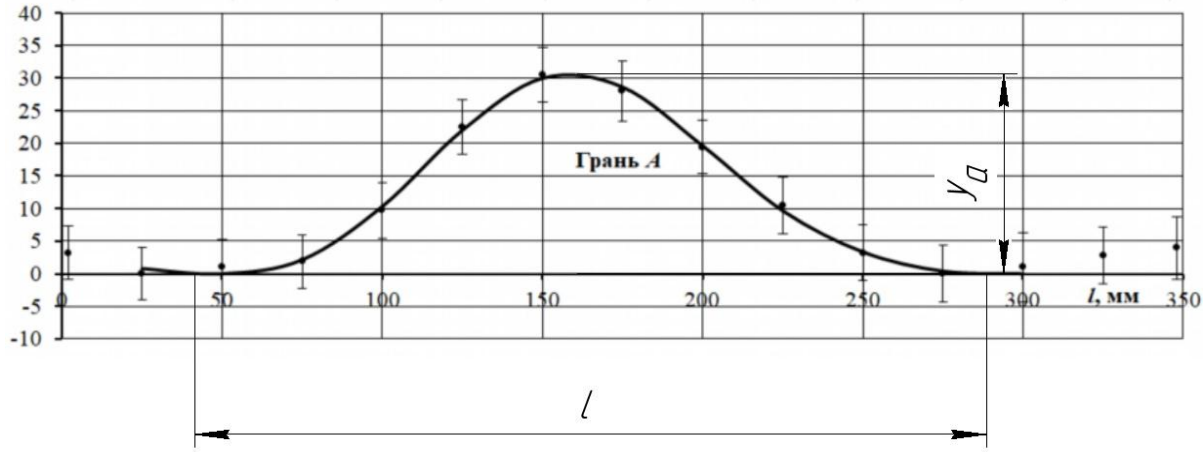


Рис. 6 - Параметри синусоїди: характерна довжина хвилі l, подвійна амплітуда y_a для грані А
Fig. 6 – Sine wave parameters: characteristic wavelength l, double amplitude ya for face A

Висновки

Розроблено алгоритм вибору оптимальних умов плоского шліфування, що забезпечують досягнення необхідної якості, у тому числі, допуску площинності оброблеиої поверхні бічних граней призматичних напрямних лінійних підшипників малої жорсткості при найбільшій продуктивності процесу плоского шліфування.

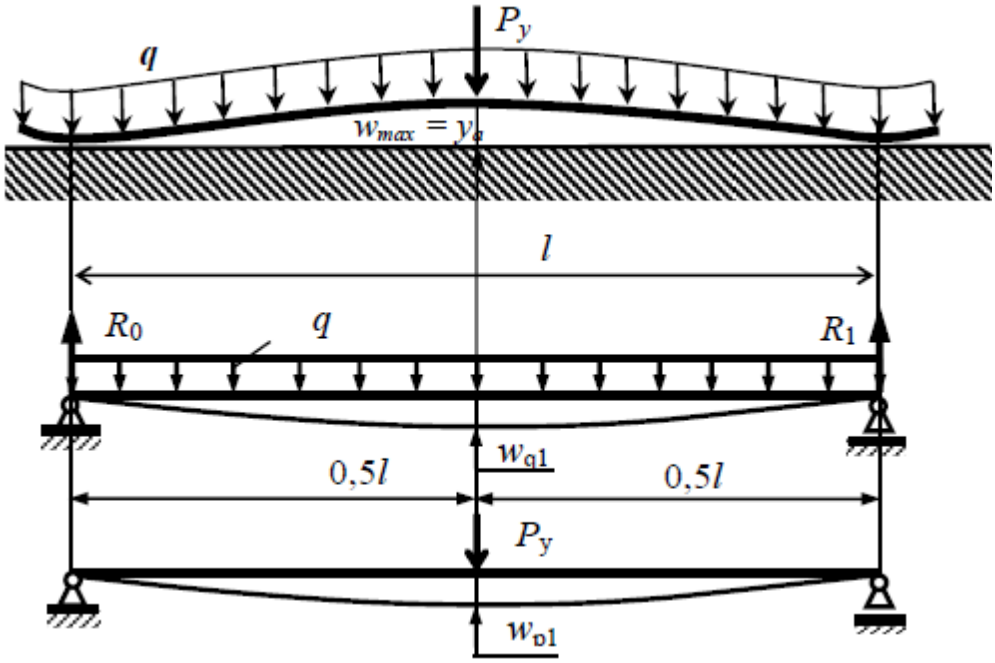


Рис. 7 - Розрахункова схема заготівлі визначення максимального прогину w_{max} (у разі початкове відхилення від площинності y)

Fig. 7 – Calculation scheme for determining the maximum deflection wmax (in the case of an initial deviation from flatness y)

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Анур'єв В.І. Довідник конструктора-машинобудівника: у 3-х т. Т.1. - 9-е вид., Перероб. та доп./під ред. Жестовой.- М.: Машинобудування, 2006. - 928 с.
2. Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K.. Capability profile of hard cutting and grinding processes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2005. – No. 54(2). –Pp. 22-45.
3. Jermolajev S., Epp J., Heinzel C., Brinksmeier E. Material Modifications Caused by Thermal and Mechanical Load During Grinding // 3rd CIRP Cjnference on Surface Integrity / Procedia CIRP 45.- 2016. – Pp. 43-46.
4. Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E. et al. Advances in modeling and simula-tion of grinding processes // Annals of the CIRP. – 2006. – Vol. 55. – Pp. 667-696.
5. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 2/1 (98). – P. 60–69.
6. Czenkusch C. Technologische Untersuchungen und Prozessmodel zum Rund-schleifen. Dissertation. University of Hannover, 2000.
7. Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S. G. Kapoor, R. E. Devor // ASME J.130. Eng. Indus. – 2001. – Vol. 123. – Pp. 753–756.
8. Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B. A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations Procedia / CIRP 82. – 2019.- Pp.302–307.
9. Soler Ya.I., Classification of flat instrumental plates by topography of ground sur-face using cluster analysis / Ya.I. Soler, V.C. Nguyen, D.Yu. Kazimirov // ARPN Jour-nal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11.Issue 21.P. 12715 – 12723.
10. Lipiński D., Bałasz B., Rypina L. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generaliza-tion // International Journal of Advanced Manufacturing Technology/ - 2017/Volume:94, Issue:1, pp 1335-1347.

Стаття надійшла для редакції 17.10.2024 Стаття рекомендована до друку 19.11.2024

[1]**SKORKIN A.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding
e-mail: Andromeda862@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3032-8341
[1]**KONDRATYUK O.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding
e-mail: kondr20071@i.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3263-0483
[1]**SKORKINA V.,**
Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding
e-mail: Skorkinava@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0411-1047
[2]**STARCHENKO V.,**
Postgraduate student of the Department of Integrated Engineering Technologies
e-mail: Vitalii.Starchenko@mit.khpi.edu.ua ORCID: https://orcid.org/0009-0008-3495-4212
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
[2]*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*
Kyrpichova St., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF THE PROCESS OF FLAT GRINDING OF PARTS MADE OF HARDENED ALLOY STEELS.

Grinding is one of the main methods of mechanical processing that determine the quality of parts manufacturing. Therefore, increasing grinding efficiency is a priority task of mechanical engineering.

One of the types of rolling bearings is a ball or roller bearing for linear movement. Significant difficulties arise when processing workpieces of low rigidity of linear bearing guides. When fixing and processing workpieces of linear bearing guides, elastic deformations occur. The size of these deformations may exceed the tolerances for the geometric parameters of the processed surface. After grinding and removing the magnetic field of the machine table, elastic deformations can return a certain amount of deviation to the geometric parameters, which may exceed the specified requirements. Technological methods for eliminating them significantly increase the processing time and cost of the operation.

When grinding parts of low rigidity, it is necessary to consider the elastic deformations of the workpiece arising from the action of the magnetic field of the machine table and cutting forces. Considering elastic deformations will allow guaranteed achievement of geometric accuracy of the part, reduction of time and cost costs for processing. Nevertheless, this issue in grinding prismatic linear guide bearings of low rigidity with limitation of elastic deformations of the workpiece during clamping and processing has not been sufficiently investigated.

KEYWORDS*: tool, surface grinding, high-speed machining, machining center, alloy steel.*

In cites: Skorkin A., Kondratyuk O, Starchenko V., (2024). *Features of the process of flat grinding of parts made of hardened alloy steels*. *Engineering*, (34), 116-124. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-11 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Anuriev V.I. Dovidnyk konstruktora-mashynobudivnyka: u 3-kh t. T.1. - 9-e vyd., Pererob. ta dop./pid red. Zhestovoi.- M.: Mashynobuduvannia, 2006. - 928 s. (in Ukraine)
2. Klocke F., Brinksmeier E., Weinert K.. Capability profile of hard cutting and grinding processes // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2005. – No. 54(2). –Pp. 22-45.
3. Jermolajev S., Epp J., Heinzel C., Brinksmeier E. Material Modifications Caused by Thermal and Mechanical Load During Grinding // 3rd CIRP Cjnference on Surface Integrity / Procedia CIRP 45.- 2016. – Pp. 43-46.
4. Brinksmeier E., Aurich J.C., Govekar E. et al. Advances in modeling and simula-tion of grinding processes // Annals of the CIRP. – 2006. – Vol. 55. – Pp. 667-696.
5. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 2/1 (98). – P. 60–69.

6. Czenkusch C. Technologische Untersuchungen und Prozessmodel zum Rund-schleifen. Dissertation. University of Hannover, 2000.
7. Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S. G. Kapoor, R. E. Devor // ASME J.130. Eng. Indus. – 2001. – Vol. 123. – Pp. 753–756.
8. Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B. A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations Procedia / CIRP 82. – 2019.- Pp.302–307.
9. Soler Ya.I., Classification of flat instrumental plates by topography of ground sur-face using cluster analysis / Ya.I. Soler, V.C. Nguyen, D.Yu. Kazimirov // ARPN Jour-nal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11.Issue 21.P. 12715 – 12723.
10. Lipiński D., Bałasz B., Rypina L. Modelling of surface roughness and grinding forces using artificial neural networks with assessment of the ability to data generaliza-tion // International Journal of Advanced Manufacturing Technology/ - 2017/Volume:94, Issue:1, pp 1335-1347.

The article was received by the editors 10/17/2024
The article is recommended for printing 11/19/2024

DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-12
УДК 621.923

[1]**А.О. СКОРКІН,** кандидат технічних наук
доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання
e-mail: Andromeda862@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3032-8341
[1]**О.Л. КОНДРАТЮК,** кандидат технічних наук
доцент кафедри машинобудування транспорту і зварювання
e-mail: Kondr20071@i.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3263-0483
[1]**В.М. КНЯЗЄВА,** кандидат технічних наук
доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: Vitok911@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3106-4897
[2]**Д.С. КИСЛА,**
голова циклової комісії
e-mail: d.kisslaya@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2400-5514
[3]**К.А. ШОФУЛ,**
аспірант кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати
e-mail: Shoful.k@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9527-6389
[1]*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна*
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.
[2]*Харківський радіотехнічний фаховий коледж*
вул. Сумська 18/20, м. Харків, 61057, Україна
[3]*Національний технічний університет " Харківський політехнічний інститут"*
вул. Кирпичова 2, м. Харків, 61002, Україна

ІМПРЕГНУВАННЯ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ

Взаємодія абразивного та оброблюваного матеріалу при шліфуванні супроводжується високим ступенем активації поверхонь, що контактують, що ініціює, зокрема, адгезійну взаємодію пари абразив-метал. Для зниження інтенсивності активації поверхонь, що контактуються, і подальшої адгезійної взаємодії пари абразив-метал в зону різання вводять змащувально-охолоджуючі технологічні середовища (ЗОТС). Використовують різні види ЗОТС та методи їх подачі до зони різання. Останнім часом великий інтерес проявляється до методу мінімальної кількості мастила.

На сучасному етапі йде пошук шляхів підвищення продуктивності та економічності процесу, якості та точності оброблюваних виробів. Одним із пріоритетних напрямів є підвищення працездатності абразивних інструментів. Напрямки вдосконалення абразивного інструменту пов'язані з поліпшенням його складових та функціональних елементів: зерна, зв'язки, будови робочого шару та конструктивного виконання робочої поверхні кола.

Раціональний вибір схеми та методу шліфування багато в чому визначає його результативність. До перспективних напрямів можна віднести високошвидкісне, силове, глибинне, профільне шліфування та ін. Однак вибір раціональної схеми шліфування не завжди дозволяє забезпечити результативність процесу. Це з зміною стану рельєфу робочої поверхні кола та умов обробки.

Важливим резервом підвищення результативності процесу шліфування є покращення експлуатаційних характеристик обладнання, що визначаються необхідною жорсткістю, демпфуючою здатністю та вібростійкістю.

Одним із найбільш поширених методів подачі мікродоз ЗОТС у зону різання при абразивній обробці є введення ЗОТС безпосередньо у пори кола (імпрегнування).

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *інструмент, шліфування, високошвидкісна обробка, композитне шліфувальне коло, сталь.*

Як цитувати: Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Князєва В. М., Кисла Д. С., Шофул К. А**.** Імпрегнування абразивного інструменту як метод підвищення результативності шліфування. *Машинобудування*. 2024. Вип. 34 С. 125-132. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-12

© Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Князєва В. М., Кисла Д. С., Шофул К. А., 2024

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

В останні 10-15 років машинобудування в індустріально розвинених країнах досягло суттєвого прогресу. Гнучке ринкове орієнтоване виробництво зажадало розробки наукомістких технологій.

Істотний вплив на знос і стійкість абразивного інструменту (АІ) надають змащувально-охолоджуючі технологічні середовища. Застосування ЗОТС знижує знос кола від 20% до десятків разів, залежно від умов застосування та хімічного складу [1-3]. Ефективність ЗОТС обумовлюється зменшенням адгезійного та дифузійного видів зношування інструменту, взаємне перенесення матеріалів, зниженням ймовірності утворення шліфувальних.

Збільшення експлуатаційних властивостей АІ можливе на етапі його виготовлення (легування абразивного матеріалу різними елементами; вико ристання надтвердого абразиву; випал зерен; введення різних наповнювачів у зв'язку та ін.) [4] або на готовий інструмент: насичення пір імпрегнаторами; створення переривчастої робочої поверхні АІ; спеціальна термообробка АІ, у тому числі у кріогенних середовищах; застосування спеціальних ЗОТС; накладання коливань; застосування твердих мастил та ін [5-7].

Компоненти ЗОТС, піддані попередньої активації, отримують додаткову енергію та переходять у метастабільний стан. Зазначений стан характеризується ослабленням або частковим порушенням внутрішньомолекулярних зв'язків, тобто стимулюється деструкція ЗОТС із утворенням активних атомів, радикалів та груп. Активні елементи утворюють у зоні контакту плівки, які екранують адгезійну взаємодію поверхонь інструменту та оброблюваного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відносно новим методом створення абразивних зерен вважається "золь-гель процес", що полягає в переході гомогенного розчину в золь і потім в гель. Перевага виготовлення зерен таким способом полягає в більш ефективному шліфуванні, за рахунок отримання високодисперсного абразиву, який менше схильний до зносу.

Одним із сучасних методів чистки шліфувального кола в процесі обробки – лазерне відчищення [8]. Використовувався лазерний імпульс тривалістю $20x10^{-5}$ з частотою 19,9 Гц, фокусна відстань 10 мм. У той момент, коли лазер потрапляє на поверхню шліфувального кола, металева стружка починає плавитися. При зменшенні фокусної відстані збільшується потужність лазерного потоку на поверхню, але ушкоджує зерно. Завдяки точно підібраним параметрам лазерного променя зменшується знос шліфувального круга. Після очищення зерна стають гострими і готовими до подальшого знімання металу. Даний метод є економічно вигідним з точки зору використання абразивного інструменту, але для найбільшого ефекту слід у кожному конкретному випадку розраховувати тривалість і частоту лазерного імпульсу, фокусну відстань, а також наявність потужної лазерної установки.

Дослідження хімічно активного елемента йоду в якості мікродобавки в ЗОТС на різних операціях механічної обробки металів та його трибологічних властивостей доводить утворення розділових мастильних плівок в результаті ініціювання хімічних реакцій між радикалами йоду та оброблюваним матеріалом. Використання йоду як компонента ЗОТС впливає на характеристики процесу різання [9].

Незважаючи на переваги використання ЗОТС, слід наголосити і на недоліках: проблеми утилізації; екологічна безпека, пожежонебезпека та ін.

Постановка проблеми

Для найкращого доступу мастильно-охолоджувальної рідини до зони різання пропонується використовувати абразивний інструмент зі спеціальними додатковими

канавками. Спіралеподібна канавка дозволяє зменшити розмір стружки, що утворюється, і зменшує навантаження на інструмент.

Перспективним напрямком є застосування на операціях шліфування композиційних шліфувальних кіл, конструктивні елементи яких заповнені твердим мастилом. Композиційні шліфувальні круги КШК покращують подачу ЗОТС безпосередньо в зону шліфування та мастильну дію середовища, знижують температуру в зоні контакту за рахунок відведення частки тепла в матеріал мастильного елемента при його розплавленні в процесі шліфування; підвищують динамічну стійкість процесу шліфування, дозволяють використовувати для забезпечення миючої та охолоджувальної дій найпростіші, практично нешкідливі ЗОТС на водній основі [10].

Шорсткість поверхонь деталей при шліфуванні із застосуванням твердих мастильних матеріалів може бути знижена за рахунок введення до їх складу наповнювачів із високодисперсних природних матеріалів та наноматеріалів. Наприклад, введення нанопорошку міді суттєво знижує середню контактну температуру [10].

Одним з найбільш доступних та перспективних засобів підвищення результативності шліфування різних матеріалів є введення у пори кола спеціальних складів (імпрегнування).

Імпрегнатор безпосередньо впливає на процес шліфування, беручи участь у контактних процесах у зоні різання, і непряме – через зміну фізико-механічних властивостей інструменту. Вибір складу імпрегнатора залежить від матеріалу, що обробляється, режимів шліфування, якості обробленої поверхні та ін.

Імпрегнування позитивно впливає практично на всі показники процесу шліфування: стійкість інструменту, шорсткість обробленої поверхні, швидкість зносу кіл та їх засолюваність, підвищує різальну здатність інструменту. У ряді випадків при використанні імпрегнованих кіл усуваються теплові дефекти шліфованої поверхні (припали, мікротріщини). Перевагою даного методу є вирівнювання властивостей не завжди неоднорідної структури абразивного інструменту, що зменшує неврівноваженість кола.

При граничному терті з важкими режимами, окремим і граничним випадком якого є тертя при різанні металів, виключена можливість гідродинамічного розклинювання поверхонь за допомогою мастила і тому наявність захисних плівок, що запобігають схоплюванню металів, набуває вирішального значення.

Метою роботи є дослідження впливу використання імпрегнаторів в абразивному інструменті для підвищення їх різальних властивостей.

Виклад основного матеріалу

Досліджувані речовини належать до різних класів сполук: неорганічні солі такі як: хлористий амоній (ХА), сірчанокислий амоній (СА), азид натрію (АН) та складні органічні сполуки гексахлорпараксилол (ГХК) тетраметилтіурамдісульфід (ТМТД), дітіодіморфолін (ДТДМ). Склад продуктів розкладання у цих речовин різний. При розкладанні АН виділяється азот. Основним газом при розкладанні СА та ХА є аміак, при більш високих температурах у СА відбувається утворення сірчистого газу, у ХА – соляної кислоти. Продуктом розкладання ГХК є молекулярний хлор. Основними продуктами термічної деструкції ТМТД та ДТДМ є монооксид вуглецю, азотисті гази, оксиди сірки.

Для визначення впливу металу на хімічні перетворення у передбачуваних імпрегнаторах проведено термографічні дослідження порошку заліза як основи більшості сталей та сплавів.

При нагріванні порошку заліза до температури 300 ºС значних змін маси немає (рисунок 1). За температури близько 360 ºС відбувається невелике збільшення маси приблизно 3 % від початкової. Основною причиною є окислення металу, т.к. нагрівання порошку відбувається в атмосфері повітря. Реакція супроводжується екзотермічним ефектом із максимумом при 460 ºС.

Терморозпад ХА починається з температури близько 200 С і при 260 С

втрата маси становить близько 4%. Найінтенсивніша втрата маси відбувається в інтервалі 260-420 ºС. Маса суміші зменшується до 15%, тобто. втрата маси становить близько 95%. З урахуванням першого етапу втрата маси в інтервалі 200-420 ºС становить майже 98 % (рисунок 2, а).

Реакція розкладання починається з виділенням тепла і перетворюється на ендотермічну ділянку з піком при температурі близько 340 ºС. Зі зростанням температури інтенсивність терморозпаду помітно знижується та супроводжується виділенням тепла. При температурі 900 ºС початкової маси залишається трохи більше 1 %.

Для суміші ХА із порошком заліза спостерігається помітна зміна характеру термічних ефектів (рисунок 2, б). Процес розкладання починається при температурі близько 210 ºС і протікає в екзотермічній ділянці.

Інтенсивне зменшення маси суміші відбувається в інтервалі до 410^0 С, втрата маси становить близько 46%. Оскільки маса заліза в даному температурному інтервалі не повинна знижуватися (див. рис. 1), зменшення маси суміші відбувається внаслідок розкладання ХА.

На термограмі суміші ендотермічні перетворення, що йдуть в область негативних значень Т відсутній, що пояснюється накладенням на термограму ХА екзотермічних перетворень, що відбуваються в зразку порошку заліза.

Низка температурних піків, що виникають у зразку суміші в інтервалі виділення газоподібних продуктів, може утворюватися внаслідок втрати однорідності суміші при виділенні газоподібних продуктів розкладання ХА та утворення повітряних зазорів між порошками суміші, порошками та стінками тигля. Порушення однорідності суміші призводить до зміни теплопровідності і на кривій DTA з'являються помилкові піки.

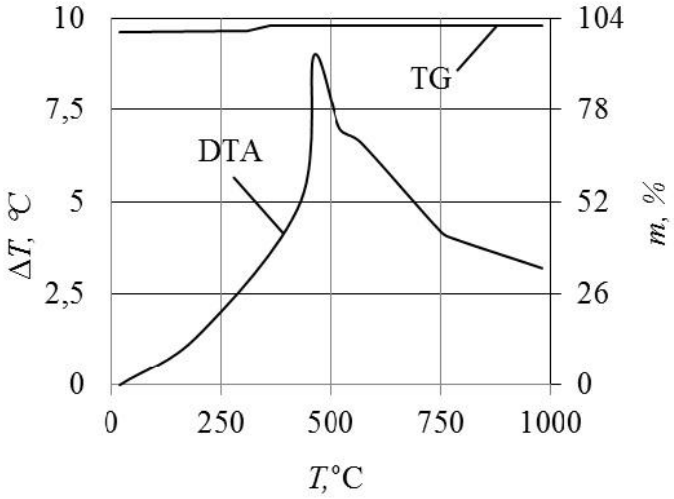
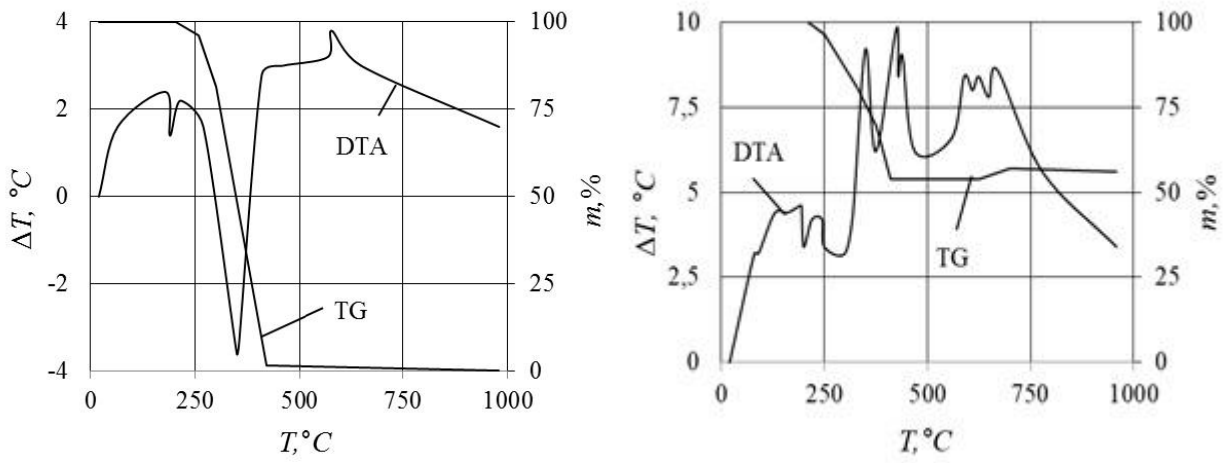


Рис. 1 - Термограма порошку заліза
Fig. 1 - Thermogram of iron powder



а б

Рис. 2 - Термограма хлористого амонію (а) та суміші хлористого амонію з порошком заліза (б)
Fig. 2 - Thermogram of ammonium chloride (a) and a mixture of ammonium chloride with iron powder (b)

Аналіз термограм рисунків 1 і 2 хоч і свідчать про можливість хімічної взаємодії продуктів розкладання ХА із залізом, але загалом можна говорити про невелику активність хімічних процесів, що протікають між продуктами розкладання ХА із залізом.

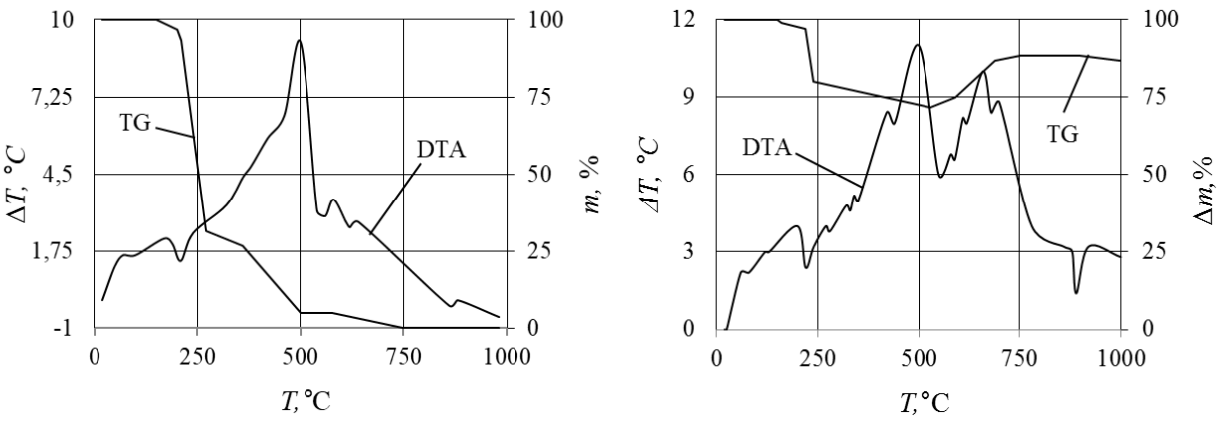
Нагрівання ГХК (рисунок 3, а) супроводжується декількома фазами розкладання речовини (крива TG). В інтервалі 150-200 ºС маса знижується на 3-4%. У розглянутому інтервалі розвивається екзотермічний процес, пік якого посідає середину інтервалу.

Зі збільшенням температури до 270 ºС вихідний продукт втрачає ще 65% маси. Це діапазон найінтенсивнішого зниження маси. В інтервалі 270-360 ° С втрата маси становить близько 5%. За температури 500 °С загальна втрата маси досягає 95 %. Ця сама температура відповідає піку екзотермічної реакції. Повне розкладання ГХК відбувається за 750 °С. Утворення всіх газових продуктів розкладання відбувається в екзотермічній ділянці діаграми.

Нагрів суміші ГХК і порошку заліза (рисунок 3, б) відрізняється менш значущою зміною маси. В інтервалі від 150 до 240ºС втрата маси становить близько 20 %. Для чистого ГХК при цій температурі втрата маси становить близько 50 %. Для 50-ти процентного вмісту ГХК у суміші втрата маси ГХК становитиме близько 25 %. Виходячи з цього можна припустити, що близько 5% додаткової маси утворюється в результаті взаємодії газоподібних продуктів розкладання з залізом.

Похибка визначення додаткової маси багато в чому залежить від кута нахилу TG лінії до вертикальної осі. На цьому інтервалі кут досить гострий і при зрушенні початку температури розкладання ГХК на 2-3 градуси суттєво зростає похибка висунутого припущення. Більш достовірні результати можуть бути отримані на пологих ділянках діаграми TG на обох графіках. Наприклад, в інтервалі температур 270-360ºС рисунок 3, а, б зміна маси обох графіках вбирається у 5 %. Візьмемо у виділеному інтервалі середню температуру – 315 ºС.

З цього випливає, що найбільш інтенсивна хімічна взаємодія порошку заліза відбувається при нагріванні в суміші з ГХК порівняно з раніше розглянутими речовинами (ХА, СА, АН).



а б

Рис. 3 - Термограма гексахлорпараксилолу (а) та гексахлорпараксилолу з порошком заліза (б)
Fig. 3 - Thermogram of hexachloroparaxylene (a) and hexachloroparaxylene with iron powder (b)

Висновки

Введення імпрегнатора в пори кола збільшує наведену середню швидкість поширення акустичних хвиль, що проходить через абразивний інструмент. При вмісті імпрегнатора ГХК у колі 5 та 7 % наведена швидкість поширення акустичних хвиль збільшується відповідно на 7 та 10 %. Імпрегнування знижує неврівноважену масу шліфувальних кіл з електрокорунду білого на 17-33% і карбіду зеленого кремнію на 33-57%.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію

Список використаної літератури

1. Reduction of oil and gas consumption in grinding technology using high pour-point lubricants / E. Garcia, I. Pombo, J. A. Sanchez, N. Ortega, B. Izquierdo, S. Plaza, J. I. Marquinez, C. Heinzel, D. Mourek // Journal of Cleaner Production. – 2013. – № 51. – P. 99–108.
2. Soler Ya. I. Selection of Highly Porous CBN Wheels in the Multiparametric Modeling of Topography for the Grinding of Stainless Steel Parts Using Fuzzy Logic / Ya. I. Soler, Nguyen Manh Tiem // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, № 11. – P. 965–973.
3. Kapłonek W. Assessment of the Grinding Wheel Active Surface Condition using SEM and Image Analysis Techniques / W. Kapłonek, K. Nadolny // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2013. – Vol. 35. – Pp. 207-215.
4. Effect of abrasive grain size on surface particle deposition behaviour of PTFE/bronze composites during abrasive wear / Z. Lin, B. Gao, X. Li, K. Yu, // Tribology International. – 2019. – Vol. 139. – Pp. 12-21
5. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 2/1 (98). – P. 60–69.
6. Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites / X. Sun, T. Yu, Y. Chen, C. Zhang, Z. Ma // Ceramics International. – 2019. – Vol. 46. – Pp. 5337-5343
7. Dhanavathu, N. N. Wear of Electroplated Super Abrasive CBN Wheel during Grinding of Inconel 718 Super Alloy / N. N. Dhanavathu, N. Mathew, L. Vijayaraghavan // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 43. – Pp. 1-8. DOI 10.1016/j.jmapro.2019.04.033.
8. A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear | Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B. // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations Procedia / CIRP 82. – 2019. – Pp. 302–307.
9. Diamond Wheel Dressing: A Comprehensive Review / W. Ding, H. N. LI, L. Zhang, J. Xu, Y. Fu, H. Su, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2017. – Vol. 139.
10. Mohan R. A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools / R Mohan, D. Ramachandran // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10. – Pp. 965-974.

Стаття надійшла для редакції 30.10.2024 Стаття рекомендована до друку 03.12.2024

[1]**SKORKIN A.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding
e-mail: Andromeda862@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3032-8341
[1]**KONDRATYUK O.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering, Transport and Welding
e-mail: Kondr20071@i.ua ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3263-0483
[1]**KNIAZIEVA V.,** Ph.D.,
Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Energy Efficient Technologies
e-mail: Vitok911@ukr.net ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3106-4897
[2] **KISLA D.,**
head of the cycle commission
e-mail: d.kisslaya@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2400-5514
[3] **SHOFUL K.,**
Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology and Metal Cutting Machines
e-mail: Shoful.k@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9527-6389
[1]*V.N. Karazin Kharkiv National University*
Svobody square, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine
[2]*Kharkiv Radio Technical College*
Sumska St., 18/20, 61057, Kharkiv, Ukraine
[3] *National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*
Kyrpichova St., 2, 61002, Kharkiv, Ukraine

IMPREGNATION OF ABRASIVE TOOLS AS A METHOD OF IMPROVING GRINDING RESULTS.

The interaction between the abrasive and the abraded material during grinding is accompanied by a high activation level of the surface in contact, which initiates, strengthens, and adhesively interacts with the abrasive-metal pair. To reduce the intensity of activation of the surface in contact and further adhesive interaction of the abrasive-metal pair, abrasive-cooling technological media (ACTM) should be introduced into the cutting zone. Various types of ACTM and methods of their supply to the cutting zone are used. Still, great interest is shown in the method of minimal quantity of butter.

At the current stage, researchers are looking to improve the productivity and economy of the process, as well as the quality and accuracy of the observed viruses. One of the priority areas is increasing the usefulness of abrasive tools. Directions for perfecting an abrasive tool are related to enhancing its storage and functional elements: grain, binder, working ball, and constructive shaping of the working surface of the stake.

A rational choice of schemes and grinding method has much to do with its effectiveness. Promising directions include high-quality grinding, power, clay, profile grinding, etc. However, choosing a rational grinding scheme will not always ensure the effectiveness of the process. As a result, the relief of the stake's working surface and the processing's mind will be changed.

An important reserve for increasing the effectiveness of the grinding process is to improve the operational characteristics of the equipment, which is indicated by the necessary rigidity, damping properties, and vibration resistance.

One of the most extensive methods of delivering microdoses of ACTM to the cutting zone during abrasive processing is the introduction of ACTM directly at the puncture pore (impregnation).

KEYWORDS*: tools, grinding, high-quality rubber processing, composite grinding wheel, steel.*

In cites: Skorkin A., Kondratyuk O., Kniazieva V., Kisla D., Shoful K. (2024). Impregnation of abrasive tools as a method of improving grinding results. *Engineering*, (34), 125-132. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-12 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Garcia, E. Reduction of oil and gas consumption in grinding technology using high pour-point lubricants / E. Garcia, I. Pombo, J. A. Sanchez, N. Ortega, B. Izquierdo, S. Plaza, J. I. Marquinez, C. Heinzel, D. Mourek // Journal of Cleaner Production. – 2013. – №51. – P. 99–108.
1. Soler, Ya. I. Selection of Highly Porous CBN Wheels in the Multiparametric Modeling of Topography for the Grinding of Stainless Steel Parts Using Fuzzy Logic / Ya. I. Soler, Nguyen Manh Tiem // Russian Engineering Research, 2016, -Vol. 36.– № 11. – P. 965–973.
2. Kapłonek, W. Nadolny, K. (2013). Assessment of the Grinding Wheel Active Surface Condition using SEM and Image Analysis Techniques / W. Kapłonek, K. Nadolny// Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2013. – Vol. 35. – Pp. 207-215.
3. Lin, Z. Effect of abrasive grain size on surface particle deposition behaviour of PTFE/bronze composites during abrasive wear / Z. Lin, B. Gao, X. Li, K. Yu, // Tribology International. – 2019. – Vol. 139. – Pp. 12-21
4. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 2/1 (98). – P. 60–69.
5. Sun, X. Effect of cobalt on properties of vitrified bond and vitrified cubic boron nitride composites / X. Sun, T. Yu, Y. Chen, C. Zhang, Z. Ma, // Ceramics International.- 2019. – Vol. 46. Pp. 5337-5343
6. Dhanavathu, N. N. Wear of Electroplated Super Abrasive CBN Wheel during Grinding of Inconel 718 Super Alloy / N. N. Dhanavathu, N. Mathew, L. Vijayaraghavan, // Journal of Manufacturing Processes. – 2019. – Vol. 43. – Pp. 1-8. 10.1016/j.jmapro.2019.04.033.
7. Peng B., Bergs T., Schraknepper D., Klocke F., Döbbeler B. A hybrid approach using machine learning to predict the cutting forces under consideration of the tool wear // 17th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations Procedia / CIRP 82. – 2019.- Pp.302–307.
8. Diamond Wheel Dressing: A Comprehensive Review / W. Ding, H. N. LI, L. Zhang, J. Xu, Y. Fu, H. Su, // Journal of Manufacturing Science and Engineering. –2017.- Vol. 139.
9. Mohan, R A review of self-sharpening mechanisms of fixed abrasive tools / R Mohan, D. Ramachandran // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. –2019. – Vol. 10. – Pp. 965-974.

The article was received by the editors 10/30/2024
The article is recommended for printing 12/03/2024

Наукове видання Навчально-наукового інституту "Українська інженерно-педагогічна академія" ХНУ ім. В.Н. Каразіна «Машинобудування» є науковим журналом, який включено до Переліку фахових видань ВАК (Б), де публікуються основні результати дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата технічних наук.

До публікації приймаються статті, які написані українською або англійською мовами згідно за правилами для авторів і отримали позитивні рекомендації рецензентів.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Електронна версія оформляється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал 1,0, всі поля по 2,5 см. Жирним шрифтом виділяються підзаголовки у статті; курсив допускається лише у виняткових випадках.

Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті. Ілюстрації подаються чорно-білими. Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці. Усі рисунки підписувати як **Рис. 1** Назва рисунку (розмір 10). Таблиці також оформляти 10 розміром. Слово **Таблиця 1** (жирним, праворуч), на наступному рядку назва таблиці жирним, по центру, розмір 10. **Назви рисунків та таблиць надаються також англійською**.

Орієнтація сторінок книжкова. Вирівнювання по ширині. Абзац 1,0 см.

Для статей необхідно вказати УДК (UDC) (ліворуч, розмір 11), ініціали та прізвище автора (розмір 11, жирним, прописними, по центру), науковий ступінь та звання (розмір 11), на наступному рядку вказати посаду, на наступному вказати e-mail та ORCID ID. на наступному рядку вказати повну назву установи (розмір 11, курсив) та її повна адреса

Назва статті (жирними прописними, по центру, 11 розмір)

Далі подати анотацію (не менше 1800 знаків) та ключові слова (5-6) мовою статті: розмір 10, інтервал 1,0. Для експериментальних статей подати структуроване резюме, де має бути вказані слова: **Мета. Методи. Результати. Висновки**.

Статті друкуються українською та англійською мовами.

Текст експериментальної статті повинен складатися з наступних розділів: «Вступ», «Методика» («Об'єкти та методи дослідження»), «Результати», «Обговорення» (можливий об'єднаний розділ «Результати та обговорення»), «Висновки», «Список використаної літератури».

Розділ «Вступ» повинен містити постановку проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; короткий аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато рішення даної проблеми, виділення конкретних невирішених питань, яким присвячена стаття, формулювання мети роботи.

Розділ «Методика» повинен містити відомості про об'єкт (об'єкти) дослідження, умови експериментів, аналітичні методи, прилади та реактиви.

У розділі «Результати досліджень» надаються отримані результати та повинно відображувати закономірності, які витікають з отриманих даних. Отриману інформацію необхідно порівняти з наявними літературними даними та показати її новизну.

У розділі «Висновки» надається узагальнення та інтерпретація результатів, аналіз причинно-наслідкових зв'язків між виявленими ефектами, і повинно завершуватись відповіддю на питання, яке поставлено у вступі.

Посилання на джерела у тексті подаються у прямокутних дужках з вказуванням номера за порядком **посилання.**

Список використаної літератури обов'язково оформляється за ДСТУ 8302:2015, до 60% мають бути в джерела, що опубліковані за останні 5 років, **URL** де є (розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0). Кількість посилань має бути не менше 15.

Через 2 інтервали також подати прізвище, науковий ступінь та наукове звання, посаду, e-mail та ORCID ID, організацію, її повну адресу, назву статті, розширену анотацію та ключові слова англійською (не менше 1800 знаків, розмір 10, міжрядковий інтервал 1,0). Анотація повинна бути побудована як реферат у реферативних журналах та відражати суть експериментів, основні результати та їх інтерпретацію. Для експериментальних статей подати структуровані резюме де має бути вказані слова: **Purpose. Methods. Result. Conclusion**.; та ключові слова (5-6).

Подати також **References**, за стандартом APA (прізвище, ініціали, назва англійською, наприкінці у дужках (In Ukrainian) та **Retrieved from або DOI**).

Україна, 61003, м. Харків, вул. Університетська, 16 Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, ННІ «Українська інженерно-педагогічна академія», кім. 207

Адреса редакції: Українська інженерно-педагогічна академія, , кім. 207, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, , м. Харків, вул. Університетська, 16 Україна, 61003 тел(057)733-78-57, e-mail: collection.engineering@karazin.ua Сайт журналу: https://periodicals.karazin.ua/engineering

Наукове видання

МАШИНОБУДУВАННЯ

Випуск 34

Українською та англійською мовами

Макетування та комп`ютерне верстання
Головченко Богдан

Підписано до друку 25.12.2024. Формат 60х84/8.
Ум. др. арк. 13,5, Обл.-вид. арк.. 14,8
Наклад 50 пр. Зам. №48/24

61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна
Видавництво

Надруковано Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб`єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009