

ISSN 2313-4763

Міністерство освіти і науки України

Херсонська державна морська академія

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (25)

Херсон  
2021

**Науковий вісник Херсонської державної морської академії** : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2021. № 2 (25). 106 с.

**Засновник і видавець** – Херсонська державна морська академія

*Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 5 від 07.12.2021 р.)*

#### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:**

**Букетов А. В.**, д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, головний редактор.

*Тематична спрямованість – Транспортні технології:*

**Гнатов А. В.**, д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, відповідальний редактор рубрики;

**Аргун Ш. В.**, к.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

**Кулініч А. Г.**, доктор філософії, Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Ляшук О. Л.**, д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

**Носов П. С.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Patlins Antons**, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

**Проценко В. О.**, д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Шарко В. О.**, д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Якущенко С. В.**, доктор філософії, Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

*Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:*

**Рожков С. О.**, д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

**Жук Д. О.**, к.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Україна, член редколегії;

**Zhiravetska Anastasia**, Dr. Sc. Ing., Professor, Riga Technical University, Латвія, член редколегії;

**Полівода О. В.**, к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

**Сіманенков А. Л.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Степенко С. А.**, к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, член редколегії;

**Хлопенко М. Я.**, д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії.

*Тематична спрямованість – Матеріалознавство:*

**Сапронов О. О.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

**Акімов О. В.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Брайло М. В.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Гусєв В. М.**, к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

**Dulebová Ludmila**, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Словаччина, член редколегії;

**Сизоненко О. М.**, д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, член редколегії;

**Стухляк П. Д.**, д.т.н., Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

**Фесенко І. П.**, д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України, Україна, член редколегії.

**Адреса редакційної колегії:** 73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20, тел. (0552) 22-35-69.

**Свідоцтво про державну реєстрацію** друкованого засобу масової інформації КВ № 18987-7776ПР від 11.05.2012 р.

**Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б»** (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова», міжнародною реферативною базою даних **Google Scholar**, міжнародною наукометричною базою **Researchbib**, представлений у **Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського**, міжнародній реферативній базі даних **Crossref**.

**ISSN 2313-4763**

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2021

ISSN 2313-4763

**Ministry of Education and Science of Ukraine**

**Kherson State Maritime Academy**

**SCIENTIFIC BULLETIN**

**KHERSON STATE MARITIME ACADEMY**

Science journal

Published twice a year

№ 2 (25)

Kherson  
2021

**Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy** : science journal. Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2021. № 2 (25). 106 p.

**Founder and publisher** – Kherson State Maritime Academy

*Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board (minutes of the panel session № 5 from 07.12.2021)*

#### **EDITORIAL STAFF:**

**A. Buketov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, chief editor.

##### ***Thematic scope – Transport technologies***

**A. Hnatov**, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, column editor-in-charge;

**A. Kulnich**, PhD, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Sch. Arhun**, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;

**O. Lyashuk**, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**P. Nosov**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**A. Patlins**, Doctor of Engineering Science, Riga Technical University, Latvia, member of editorial board;

**V. Protsenko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**A. Sharko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**S. Yakushchenko**, PhD, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board.

##### ***Thematic scope – Automation and computer integrated technologies***

**S. Rozhkov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

**D. Zhuk**, Candidate of Engineering Science, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, member of editorial board;

**A. Zhiravetska**, Doctor of Engineering Science, Professor, Riga Technical University, Latvia, member of editorial board;

**O. Polivoda**, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**A. Simanenkov**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**S. Stepenko**, PhD in engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of the editorial board;

**N. Khlopenko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board.

##### ***Thematic scope – Materials science and engineering***

**O. Sapronov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

**O. Akimov**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**M. Brayilo**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**V. Husiev**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**E. Dulebová**, PhD., assoc. Prof., Technical University of Kosice, Slovakia, member of editorial board;

**O. Syzonenko**, Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;

**S. Smetankin**, PhD, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**P. Stukhlyak**, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluji National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**I. Fesenko**, Doctor of Engineering Science, V. Nakul Institute for Superhard Materials, Ukraine, member of editorial board.

**Address of the editorial board:** 20, Ushakova av., Kherson, Ukraine, 73000, phone +38 (0552) 22-35-69

**Certificate of registration** of the published media outlet by Resolution № 18987-7776IIP from 11.05.2012.

**The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category “B”** (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 from 02.07.2020).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

***МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ***

***SEA AND RIVER TRANSPORT***

## THE CHALLENGES AND IMPACT OF COVID-19 ON SEAFARER'S RIGHTS AND FREEDOMS

**Mgeladze M.**, *PhD Candidate, Ankara University, Turkey, e-mail: mgeladzemariam@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9354-2620;*

**Surmanidze G.**, *Navigation Officer, Georgia, e-mail: gochasurmanidze574@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9375-6066.*

*This article discusses the importance of protection seafarer's rights and freedoms and enforcement of international protocols, which designates seafarers as key worker and learns challenges and experience from the Covid-19 as an important driver for improving international legal instruments. Therefore, it has a crucial importance to focus on seafarers' rights and develop tools, effective, goal-oriented due diligent action plans and mechanism, raise of the global awareness of human rights abuses at sea and deliver the positive changes through the legal and policy development, exchange of views and the best practices for protection seafarer's rights despite of the Covid-19 situations.*

*For these purposes, the presented article researches a new emerging challenge of global maritime society such as protection, preservation and enforcement of seafarers' rights at sea during Covid-19. In this relation, this article discusses the relevant international legal instruments, such as UNCLOS, 1982, MLC, 2006 and Human Rights Law as well. The present paper also describes the response of the maritime industry to the impact of COVID-19. Lastly, article comes with the conclusion and recommendation.*

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.006-017**

**The Problem Statement.** Seafarers ensure the smooth operation of the maritime industry on daily basis and they are playing a crucial role in the global economy and global trade. Prior to Covid-19 seafarers have been working on board of the vessel for significantly longer than they have originally been contracted. In order to avoid uncontrollable spread of the virus, States enforces different and strict restriction and regulations, therefore seafarers were obliged to stay on board of the ship more than 11 month and lots of them were absolutely prevented to return to ships. Those uncertain and complex legal regulations have gradually faded, altered and infringed seafarers' rights and freedoms, wellbeing, health and safety enforced and secured by the MLC, 2006. Interestingly, it created humanitarian crisis, affected maritime business and economy of State.

**The relevance of the issue.** In order to address the crisis caused by the Covid-19, various international organizations such as the Office of the UN High Commissioner for Human Rights, the UN Global Compact and the UN Working Group on Business and Human Rights several times stated that seafarers are "collateral victims" of Covid-19. [2] Therefore, the UN General Assembly, International Maritime Organization (IMO) [3], International Labor Organization (ILO) [4], International Chamber of Shipping (ICS) [5] and the International Transport Workers' Federation (ITF) [6] adopted number of legal instruments for protection and preservation of seafarers basic rights and urged States to recognize seafarers as "key workers".

In order to maintain effective and robust maritime system, it has great importance to research the effects of pandemic to the seafarers' rights and freedoms. More importantly, understanding the impacts of the Covid-19 will enable the industry to fill the gap existed in matters of protection and preservation of seafarer's rights and freedoms. Nevertheless, it will contribute supplement the knowledge by examining the impact of COVID-19 pandemic on seafarers' rights to shore leave, repatriation and medical care and their well-being. Beside of it, the raise an awareness regarding international legal instruments that has been developed for protection of seafarer's rights are key element for seafarers to enjoy and address their rights relevantly.

Significantly, protection of seafarers' rights and freedoms are currently one of the most complex and emerge matter that global maritime industry tries to address. Hence, it is important to underline that the protection of seafarer's rights and freedoms requires involvement of the relevant State organs, international organizations, shipowners and relevant stockholders together

in order to develop relevant, clear, visible and accessible action plan. The development of successful protection mechanism requires from maritime industry actors to participate and collaborate with each other in order to balance the business interest and issues of enforcement and enjoyment of basic human rights by the seafarer. Therefore, taking into account the negative impact of the Covid-19 on the protection and preservation of Seafarer's rights and freedoms urges decision makers to focus on this matter and develop effective tools, action plans and mechanism through enforcement of the relevant international legal instruments.

**The aim of the article.** Overall, this article discusses the importance of protection and preservation of seafarer's rights and freedoms and enforcement of international protocols, guidelines and recommendations which designates seafarers as key worker. It learns challenges and experience from the Covid-19 as an important driver for improving international legal instruments, such as Maritime Labor Convention (MLC), 2006. Additionally, paper tries to raise of the global awareness of human rights abuses at sea and urges global maritime stakeholders that despite Covid-19, positive change through the legal and policy development, harmonization and standardization of international legal instruments, collaboration and exchange of the best practices for protection seafarer's legal interests and rights are the prior step for further development of the maritime business and industry in general.

**Materials and methods.** In course of research, exhaustive list of relevant leading materials was identified. For comprehensive and complex understanding of subject matter, various databases were explored, researched and analyzed. This article is developed through the analysis of primary and secondary resources. In course of research, various mandatory international legal instruments and legislation was researched. In case of subsidiary sources different books, journals, articles, electronic resources were used.

The main focus of the article is legal regulating regimes that had been adopted to solve the crisis caused by Covid-19. Additionally, article defines all efforts made by international organizations do address the matters of protection and preservation of seafarer's rights. Aside of the international regulatory framework, State legislation and regulations of the crisis caused of Covid-19 is also examined. Overall, for this article qualitative research method is used and conclusions and final recommendations are drawn based on literature review.

**Conclusions.** It is doubtless that the results of Covid-19 creates comprehensible and essential conditions to develop a new human rights code of conduct, the effective, goal-oriented action plan and due diligence guidance on seafarers' rights in order to fix the gap existed in labor and human rights policy and practice and to raise the bar of seafarers' working conditions, well-being, mental health and welfare.

**The main body of the text.** During Covid-19, the labor rights and freedoms unforced by the MLC, 2006 had been hindered. The MLC, 2006 is an international legal instrument which *inter alia* guarantees equal access to basic human rights. [7] MLC is known as a "Seafarer Bill of Rights" which, by virtue of Article 4 and 5 obliges all Member States of the convention, to adopt, implement and enforce laws, regulations and measures to protect seafarers' legal rights [7]. The rights endorsed by MLC, 2006 can be constituted as Human Rights and remains applicable for everyone and everywhere.

During Covid 19, a few sensitive and key rights and obligations had been suspended and violated, namely rights of shore leave, medical assistance, and contractual relationship. Those rights are governed by the virtue of Regulation 2.1, 2.4, 2.5 and 4.1 of MLC, 2006.

The Regulation of 2.1 of MLC, 2006 states that seafarer must be provided with relevant and sufficient information about the working employment contract before signature and defines that the largest scale of maximum contract extension has to be less than 12 months [7] The provisions of the contract shall meet standards enforced by the convention.

Under the section 2 of Regulation 2.4 and Guideline B2.4.2 of the MLC, 2006 Seafarer are granted rights of shore leave which guarantees well-being, welfare, protection of personal and social rights, and consistency with the operational requirement relevant to the position [7]. In case of *Aguilar v. Standard Oil Company Case*, Supreme Court ruled that this right is elemental

necessity for seafarers [8]. Therefore, each Member State are obliged to adopt the relevant legislation to regulate matters of shore leave.

The regime of repatriation is regulated by the Regulation 2.5. which states that seafarers have a right to be repatriated at no cost to themselves. Additionally, in accordance with subsection b of section 2 of the Standard A.2.7, the maximum duration of service periods onboard of the vessel which a seafarer is entitled to repatriate shall be less than 12 months [7]. In this respect, Standard A 2.5 states that each Member State has cumulative obligations, such as to ensure that rights of repatriation are prescribed by the relevant laws [7] and financial security are provided to seafarers based on Regulation 2.5 of the MLC, 2006, if shipowner fails to make arrangements for or to meet the cost of repatriation [7].

In accordance with section 1 of the Guideline B2.5.2 and Article 5 of the Vienna Convention on Consular Relations, 1963 [9] the rights on consular assistance are guaranteed for seafarers stranded in a foreign port. In this respect, competent authority in the foreign port, local representative of the Flag State, seafarer's State of nationality or State of residence shall be informed and they have to facilitate and provide the access to relevant consular assistance immediately [7].

Regulation 4.1 of MLC, 2006 addresses matter of health and medical cares and states that Member State is obliged to ensure that seafarers are covered by adequate measures for the protection of their health, they have access to prompt and adequate medical care and health protection system with no coast of seafarer [7]. The Standard A4.1. of MLC, 2006 improves Member State's obligation to enforce relevant laws regulating requirements for hospital and medical care facilities on-board and measures for health protection and medical care [7].

The right to the health is a fundamental part of human right and is recognized by various international human rights instruments [10] and involves access of all to the relevant health care system and assistance equally without any forms of discrimination [11]. Therefore, seafarers' right to medical assistance is human right law [12] and shall be enforced respectfully.

During Covid-19, all above mentioned rights and regulations were violated. Seafarers were experienced denial of their rights, inclusive shore leave rights, they were stranded onboard of the vessel, other in shore were not permitted to enter on board of the ship due to the restriction imposed by States, ports, shipowners, and maritime companies [13]. After Covid-19, non all seafarers were compensated with a bonus or full wages, namely just 41% seafarers had got compensation, whilst 32% were not being given. One of the difficult problems for seafarers was a limited availability of medical assistance and insufficient medical abilities to deal with the Covid-19 as well [13].

Due to above mentioned reasons seafarers experienced troubles of mental health, work-related stress, extension, and fatigue [13, 14, 15], which no doubt damages the quality, sustainability, efficiency and effectiveness of work performance, safety of ship and environment [14].

Circumstance that had been created during the COVID-19 on board of the ship, namely denial or refusal to shore leave, abandonment of seafarer, denial of medical care and assistance, refusal of compensation for service provided beyond 12 months may be interpreted as forced labor [16], which is violation of international legal instruments [13, 14] and Human Rights Law.

Additionally, the regulation which was imposed to guarantee safety and security of society and avoid spread of Covid-19 was not in balance with the international regulations, in the sense that those rights have not be just suspended, but it was impossible to enforce and implement them even through protection of all the safety rules given by World Health Organization.

May Covid-19 be constituted as a force majeure where States are incapable to enforce standards derived by MCL, 2006 convention? There is different position of scholars in this respect. [13, 14] It is not a doubt that enforcement of the minimal standards of MLC was complicated to the reason of the Covid-19. The Pandemic created the circumstances where it was objectively impossible for States to perform their obligations, however Covid-19 does not

terminated or suspend obligation for State to resume the compliance with the MLC, 2006. While admitting that, international organizations developed different measures and mechanism for States and shipowners to resume non-compliance with MLC, 2006 even it is challenging or difficult.

When it comes to protection, enforceability and preservation of human rights, there are not direct regulations in UNCLOS, 1982 for those specific matters. However, articles 146 and 94 of the UNCLOS, 1982 states that Member State shall impose measures for protection human life [17] and exercise effective jurisdiction on administrative, technical and social matters over ships flying its flag. [17] In this respect, UNCLOS just provide the starting point and makes a reference to the international regulations and organizations having mandate to regulate working and social conditions of seafarers. [18] The systematic interpretation of the articles 146 and 94 makes it clear that Member State are obliged to adopt proper mechanism for effective protection, enforcement and preservation of international human rights law in accordance with the standards derived from international legal instruments.

Therefore, the responsibilities of State in relation of adoption or protection of human rights are drawn from international human rights conventions, declarations, treaties and covenants. There are lot of discussions about universality of human rights, and if States jurisdiction and responsibility for protection of those rights are applicable in maritime zones in general. However, different maritime zones do not question the matters of full application of basic human rights and there is not a doubt that States bears the responsibility to the vessel flagged to this certain State.

Taking into account all above said, the protection and preservation of human rights falls within the State jurisdiction. Therefore, when it comes to the applicability of human rights, it shall be said that human rights are *jus cogens*, universal, and it is applicable to anyone without any discrimination and everywhere to the land, sea and air. [19] States shall adapt relevant laws and impose effective jurisdiction in respect of preservation and protection of human rights. [10] In this respect, the European Court of Human Rights in *Hirsi v Italy* case [20] underlined that State shall ensure effective exercise of jurisdiction and control over its vessels [20].

International legal instruments do not clarify or provides special rules whether flag State or port State is obliged to protect, enforce and preserve human rights law, however it does not release States from the obligation to protect general Human Rights Law which is applicable to anyone, everywhere in all maritime zones and areas despite of force-majeure situation. [30] In this respect, the article 2 of the Universal Declaration of Human Rights states that everyone, without any kind of discrimination or distinction, are granted and entitled all rights and freedoms and nothing shall preclude to enjoy the basic human rights and freedoms. [10] Nevertheless, by the virtue of the Article 1 of the Convention for the Protection of Human Rights and Fundamental Freedoms, contracting party has an obligation to act within their jurisdiction in order to ensure that the protection of rights and freedoms are guaranteed respectfully [10].

Various international human rights mandatory legal instruments also secure rights of work, enjoyment of just and favorable conditions of work, social security, adequate standard of living, rights of physical and mental health [10]. Additionally, the International Covenant on Civil and Political Rights forbids performance of forced or compulsory labor by the virtue of article 8 and 10 [10]. In this respect, all human rights legal acts impose the main principle, that contracting parties bares the responsibility of protection and preservation of rights and freedoms, and has the primary obligation to impose relevant laws and regulation to give full effect of application of guaranteed rights.

All above mentioned legal instruments are addressing matters of applicability of rights and freedoms as well as. Those instruments also approach the framework of regulation and enforceability regimes of specific rights. Nothing shall jeopardize the applicability, implementation and enforceability of secured, granted and guaranteed rights. However, very basic and key rights that had been triggered and infringed in course of the Covid-19. Most of

rights had been suspended and infringed by the way that fools outside of scope of above-mentioned human rights legal instruments.

In general, enforcement, enjoyment, preservation and protection of those rights definitely are applicable at seas, therefore State's responsibility to enforce its jurisdiction over these matters are enshrined and derived not only from the international human rights treaties but also are defined by the MLC, 2006 as well. Therefore, regulations to avoid spread of Covid-19 were not in line with MLC, Human Rights Law and UNCLOS. From that point, it becomes crucial for whole maritime industry to develop relevant legal and policy for addressing the explicit application, protection, and enforcement of human rights at sea especially during these uncertain times. In this respect, all State, whether it is Port States, Coastal States or Flag States has an obligation to implement and exercises relevant jurisdiction over human rights matters in accordance with international human rights compulsory legal instruments.

As it was mentioned, the crisis caused by Covid-19 was significant on shipping industry. However, the governance and collective measures undertaken by the international organizations was exceptional and valuable. Measures, limitations, restrictions, bans and lockdowns that had been enforced by States to safeguard citizens made almost impossible for seafarers to enter into ports and enjoy rights of shore leave and repatriation. More importantly, those measures created serious "humanitarian crisis" and hindered the safety and economic interests that affected maritime business, shipowners, States, societies and seafarers. In addition, the problem caused by Covid-19 was directly damaging the mental health, wellbeing and safety of the seafarer as they were completely exhausted, unable to perform their duties and unfortunately demoralized as well. The consequences of restrictions and Covid-19 became global and emerging concern. Therefore, as the interests of the different actors had been hindered, international maritime organizations step in and called to States and governments to act in order to avoid collapse of the industry. It was clear that States needed to adopt effective, measurable and time-bounded strategy to govern the situation and facilitate the recovery of the industry.

It is obvious that due to the lack of capacities, social and economic challenges, unpreparedness of health care system, troubles of health care facilities and equipment, the crisis caused by Covid-19 were governed differently. It is perhaps not whole list of the challenges that complicated the governance of the crisis for States.

In order to provide relevant assistance and help, international organizations developed several protocols, guidelines, recommendations and resolutions for Member States, shipowners and maritime companies. It has great importance, to discuss the measures that had been adopted for the purposes to fill the gap existed into the international legal instruments and maritime industry as well. The Covid-19 clearly showed the weak sides of the maritime industry that was considered as a robust before outbreak of the pandemic. It has a great importance to discuss, collective and protective measures adopted by international organizations and enforced by State in order to inform readers and interested seafarers as well, that there are already international mandatory legal instruments which enables them to protect their rights and interest in case of any abuse or violation of basic and/or labor rights.

In order to minimize the effects of the Covid-19 on the maritime industry, seafarer's and shipowners, international organization, such as IMO, ILO, WHO and ITF adopted complex, systematic and comprehensive protocols and guidelines. [21] In their framework of competence and mandate, organizations addressed matters of crew change, resupply, certification of the seafarers, labor and social security rights.

IMO within the framework of its mandate developed various circulars and protocols which provided measures to govern the crisis caused by Covid-19. Beside of the uniform recommendations, guidelines, circular letters, IMO also created the Seafarers Crisis Team in order to provide relevant assistance to seafarers together with the ILO and ITF. [22] In relation to seafarers, IMO also adopted the term such as "Key worker" which underlines important role of seafarers in social functions. Moreover, IMO together with United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) urged Member States of the organization to perform effective,

pragmatic and practical actions for smooth repatriation and crew change. All above mentioned organizations collectively called States to make an exception for seafarers to travel and return at home [22].

Additionally, IMO, together with ILO provided consultations to Port State Control regimes asked for collaboration in the matters of crew change and repatriation of seafarers. On the other hand, organizations agreed with the Port State Control to collaborate in matters of the documentations and certifications of the seafarers. In this respect, through the inspections of vessels and relevant documentations, Port State Control was asked to play important role to maintain and monitor applicability of the international standards on board of the vessel, especially in cases where the labor contract was extended more than allowed, maximum accepted period defined by the MLC, 2006 [22].

In accordance with the statistical information provided by the IMO 400,000 seafarers were trapped on board of ships and were not able to repatriate during the Covid-19. IMO underlined that another 400,000 seafarers were not able to perform their duties and join the vessel. In addition, IMO expressed that those restrictions had negative implications on seafarers' welfare, mental health and well – being. During Covid-19 seafarers were working on board of the vessel for 12 hours every day, and it became obvious that they were exhausted. Therefore, IMO urged Member State to take statistical information into account and developed the 12 steps protocol to facilitate the crew change issues as well [22].

In this respect, it is significant to mention that, during Covid-19, the crew change crisis was one of the painful issues to regulate for international organizations, shipowners or States. Based on statistical information revealed by IMO, ILO, ITF, UN General Assembly adopted the Neptune Declaration on Seafarer Wellbeing and Crew Change in order to protect and preserve seafarers' rights. The declaration acts together with numerous remodulations, recommendations and protocols. Currently, more than 850 organizations signed the declaration. More importantly, this document constates basic action which shall be undertaken for crew change. The act was issued for purposes to address and resolve the crew change crisis caused by Covid-19 for the purposes to facilitate maritime industry and supply chain. Later, the Neptune Declaration Crew Change Indicator was developed in order to maintain, monitor and control data regarding crew change situation [23].

Moreover, IMO also expressed its concerns regarding access on medical assistance and medical care which were not provided to the seafarer's strand on board of the vessel, and constituted it as an abandonment of the vessel in distress and infringement of human rights. Lastly, for the appreciation and recognition of the service provided by the seafarers in course of Covid-19, IMO nominated 2021 as a «year of action for seafarers» [22].

Whereas ILO adopted an Information Note on Maritime Labor issues which encourages Member State to improve existing standards given by MLC, 2006 and stated that Covid-19 does not annul or terminate those obligations, therefore Member State is responsible to resume the compliance as soon as the circumstances justifying non- performance will no longer present. In the Information notes on maritime labor issues and coronavirus (COVID-19). Revised version 3.0, ILO discusses that provisions of MLC, 2006 were suspended in light of the Covid-19 [24]. More importantly, the documents come with the recommendation for Member States, that despite the Covid-19, which makes materially impossible to perform the obligation, it is vital to enforce measures which will be meet requirements given by MLC, 2006. In this respect, above mention document develops following recommendations for Member State:

1. to remove regulations which complicates travel of seafarers;
2. to collaborate in matters of repatriation of Seafarer;
3. to provide medical help to the ship without any further delays or complications;
4. underlines that shipowner is responsible to cover all financial expenses if seafarer got infected on board of the ship;
5. that rights of repatriation shall be granted without increasing of the risks of infection.

[24]

On the other hand, the WHO adopted International Medical Guide for Ships to manage the Covid-19 cases on board of the vessel in order to ensure that seafarers have access on relevant health protection, medical care, medicine, medical equipment, treatment, information and expertise, safe and effective use of personal protective equipment [25]. In addition, WHO also developed “the guidance on the safe and effective use of personal protective equipment” which provides relevant safety rules for minimizing the risks of infection on board of the ship. [26] In this respect WHO urges seafarers and shipowners to use specific personal protection equipment. Above mentioned protocol together with International Medical Guide act applies to all types of ships, to passengers and crew members, all personnel of the ship.

ITF assisted seafarers to get off from ship. ITF was fully engaged into the process of repatriation from board of the ship and safe return of seafarers at home. More importantly, organization inspected the vessel and inspected all potential cases where rights of seafarers were violated or infringed. Additionally, in order to provide relevant help to vulnerable seafarers, ITF developed relevant guidance to protect seafarers right during the COVID-19 [6]. The guidelines contain list of practical and pragmatical recommendations for shipowners or States to facilitate protection, informants and preservation of basic human rights of seafarers. Guidelines was basically adopted to facilitate and enables shipping industry keep moving and working without any delays and complications. ITF also urged States to communicate with Port State, Coastal State, shipowner and maritime companies in matters of shore leave and repatriation of seafarer [6].

International organization developed various circulars, guidelines, protocols and guidelines for Member States and for shipowners as well, as they remain responsible to implements and enforce above mentioned mandatory instruments on board of the ship. In order to avoid collapse of the maritime trade and maritime supply chain, shipowners were urged to facilitate the repatriation of seafarers after the completion of the labor contract at the nearest port without hindering safety and security of seafarers. Shipowners were encouraged communicate on matters of crew change, health care needs or shore leave with relevant ports and States.

During Covid-19, States adopted restrictions and bans which had negative impacts on rights and freedoms of seafarers at sea. It is also understandable, that regulations were enforced to avoid widespread of Covid-19, but on the other hand it violated seafarers’ basic rights and interests as those regulations were not proportionate, fair, predictable, accessible and stable. Due to this reason, international organizations encouraged States to remove all possible and hindering rules which was complicating operation of maritime industry as well. In this respect it is more than obvious that open and smooth operation of maritime industry safeguards not only business interests, but increases prospects of economic prosperity of the State and society as well as. Therefore, it is important for State and for Port States to follow the international standards and framework, without violating a Basic Human rights and Freedoms. It is also understandable, that regulations were enforced to avoid widespread of Covid-19, but on the other hand it violated seafarers’ basic rights and interests.

The crisis caused by the Covid-19 and matters of adoption mechanism for seafarers’ protection was different. In case of Republic of Georgia different measures was adopted to govern the crisis. In order to address the results of Covid-19 and provide relevant help and assistance to the seafarers, the Republic of Georgia categorized seafarers as «Key workers» [27] and adopted relevant legal instruments in accordance with the guidelines, resolutions and protocols issued by the international organizations.

The Maritime Transport Agency of Georgia (MTA) [28] is the national regulator of the maritime transport field in Georgia. MTA is responsible to implement, harmonize and enforce all the maritime legal instruments derived from national and international legislation. In MTA is authorized body which has full competence to maintain, improve, coordinate, perform, develop and monitor, adopt and enforce relevant measures in maritime field [28].

In order to implement standards which were developed by the international organizations to promptly address crisis caused by the Covid-19, MTA adopted measures regarding seafarer's certification and training system [29].

The Director of Maritime Transport Agency under the under the auspices of the Ministry of Economy and Sustainable Development issued Order N5 dated April 6 2020 «On certain measures to be taken in the Georgian seafarers' certification and training system in Connection of the spread of the novel coronavirus COVID-19», which was addressing matters of certifications and training opportunities [29].

Due to the challenges caused by COVID-19, MTA also expressed readiness to issue relevant certifications for seafarers to fulfill and meet other prescriptions and regulations derived from acting legislation of Georgia. Based on the Circular No. 18/CIRC/STCW, the validity of seafarers' certificate of competency, certificate of proficiency and seamen's book were automatically extended for 6 months [29].

It is important to underline here, that the above-mentioned Circular also was regulating matters of the validity of the medical certificates. During Covid-19, all the medical certifications of the seafarers who were serving on board of the vessel were automatically extended by 6 months by the virtue of the Order N5 and the Circular Letters of International Maritime Organization. In this respect, seafarers were not asked to make any application for extension the validity of all above indicated certificate as it was extended without any additional procedural requirements [29].

During Covid-19 educational institutions were also working in order to provide relevant assistance and help in their scope of competences. The relevant training and certification centers in collaboration with MTA were providing the access to the relevant training courses. The educational institutions and authorized maritime training centers enabled seafarers to submit their application and register the courses where the lectures were provided as face-to-face principle but also remotely [28].

Despite of the Covid-19, all the matters were governed in accordance with acting legislation of Georgia, STCW Convention, and international mandatory legal instruments, standards and requirement. In addition, MTA also fully adopted all the international legal instruments that were enforced by the relevant international organizations such as UN, IMO, ILO, ITF in course of the Covid-19 [28].

MTA started collaboration with the relevant shipowners and facilitated to the repatriation of the seafarers. In this respect, all the decisions undertaken by the MTA, inclusive guidelines, protocols or resolutions were open, visible and transparent for interested third parties and persons [28].

In respect of shipowners, port operations, maritime companies or operators, pilots and masters of Georgia flagged ships were obliged to fulfill regulations prescribed by the above mention Circuit. MTA also implemented a wide range of precautionary measures and different solutions, to ensure the smooth operation of the maritime supply chain and port sector in the country in response of the pandemic taking into consideration the relevant recommendations issued by the IMO, WHO, ILO and the Government of Georgia [28].

In course of the research, based on available materials and information, it can be concluded that the measures adopted by MTA remained effective and shall be constituted as the best practice.

This article researched the best practice that has been promptly developed by the international organizations. Based on above mentioned legal instruments, it is recommended for Flag State to ensure that seafarers rights and freedoms are protected and measures undertaken on board of the ship meets standards provided by the international organizations. State shall ensure that comprehensive, coherent, practical, pragmatism and effective measures are undertaken by the shipowner on board of the ship and maritime companies as well. In this respect, it is important to communicate, monitor and control if shipowners fulfill and performs obligations derived from the protocols, guidelines and recommendations. Article comes with the

recommendation that Flag State and Port State shall collaborate to effectively solve any issues concerning crew change, repatriation of seafarers, renewal of the relevant certificates and any documentation. Last, but not least, in order to govern the causes of Covid-19 and deal with the rights of seafarers Member States has an obligation to adopt legislative measures which are proportional to the protected interest, transparent, fair, predictable, equal accessible and stable without hindering and damaging basic human rights and freedoms.

It clearly shown in this article, restrictions and bans, lockdowns and measures adopted by States had been disproportionate and were not in comply with international standards. As the result, it had a negative impact on seafarer's health, well-being, safety and security. The results of this research is that despite the fact how emerged or desperate situation is, emergency and restrictive measures shall fully comply international human rights law and fundamental principles of the rule of law. The standards endorsed under the international law shall prevail and measures shall be in balanced with the protected interest.

This research paper provided relevant facts and statistical information about seafarers whose basic rights had been violated. The results of Covid-19 makes crystally clear that there is high need to create comprehensible and essential conditions where full application of basic human rights will be possible for seafarers. Nevertheless, the effective, comprehensible, goal-oriented action plan, the new human rights code of conduct, and due diligence guidance on for preservation and protection of seafarers' rights are highly crucial to be adopted.

The Covid-19 showed to the maritime industry, stakeholders, international organizations and States gaps and flaws existed in labor and human rights policy and practice. Therefore, it is vital to undertake steps in order to raise the bar of seafarers' working conditions, well-being, mental health and welfare.

However, implementation and adoption of the international legal instruments is not enough. The shipowner and State shall take responsibility to improve, enforce and meet international standards and the best practice regarding seafarer's repatriation, working condition, medical assistance and mental health. It is considered that the positive impact and success of the maritime chain shall be interpreted in line with the protection, respect, preservation, enforcement and implementation of seafarers' rights into practice, which definitely goes beyond legal and regulatory compliance, but also requires proper engagement of relevant decision makers, States, international organizations, interested parties and maritime stakeholders. This article recommends for actors of maritime industry to collaborate, monitor, perform and enforce its duties and obligations respectfully.

The effects of Covid-19 are an experience that educational institutions and training centers shall take into consideration in order to enhance the awareness and build relevant capacities among seafarers to deal with the virus effectively and efficiently. On other hand, they also need to educate seafarers and provide relevant knowledge about measures of protection of their rights and freedoms. In this respect, rules, protocols, resolutions and guidelines adopted by the international organizations shall be visible, accessible and deliberated to seafarers immediately.

There is no doubt, that the Covid-19 has a negative implication on fundamental, personal, social and other rights. The restriction, bans, strict regulations and measures were not proportional. High level of the safety and security rules shall take into account other objectives circumstances and shall not open the possibility for disproportionate infringement into the protected *jus cogens* rights. The results of Covid-19 gives ground to come to the conclusion that emergency and restrictive measures shall fully respect international human rights law. Therefore, despite the fact how desperate and urgent the situation is, the fundamental principles and fundamental rights have to prevail, every protective measure shall be in balanced with the protective interest. In this respect, the measures adopted by the States failed to satisfy the standards enshrined and shaped in international compulsory legal instruments.

The article researched that, based on factual evidences ships and seafarers did not have a proper access to the medical service and infrastructure in general. In this respect, it has to be

said, that the health rights are human rights and human rights are seafarers' rights. Restriction and delays to provide relevant assistance to the ship where protentional risk that wellbeing of seafarers will be affected is high, can be constituted as an ignorance and failure to perform obligations derived not only from international law, but also from a national law as well.

The Covid-19 also revealed gaps and limitations in the maritime employment contracts, and seafarers' social protection systems. It also appears that capacity to protect the rights of those more vulnerable is very low and shall be addressed immanently. Therefore, there is high need to adopt proper mechanism and due diligence tool for provision relevant medical help and assistance to the ships during pandemic period.

**Final Remarks and Conclusion.** It is without doubt, that seafarers make significant contribution to global maritime business and it remains important to safeguard full package of their rights and freedoms.

The outcome of this research paper is that, it is vital to consider seafarer as «Key workers», and grant them exceptions taking into consideration existence of their special, objective, exceptional circumstances, reasons and situation. Therefore, it is recommended and suggested that regulations, policies and measures which will be undertaken for safety and security purposes shall not violate and hinder the Basic Human rights of Seafarers, because everyone shall be treated equally without any forms of discrimination and violation of rights and freedoms enforced by Human Rights Law.

Finally, it is obvious, that the Covid-19 brought new reality in maritime sector. The effects of Covid-19 makes clear that maritime sector need to renew standards to create a strong, effective, efficient, suitable, robust system where all rights and freedoms are protected and safeguarded despite the fact how desperate the situation is in accordance with the standards shaped by the international human rights.

The results of this paper may be used for teaching, academic, theoretical and practical purposes. Paper also encourages academia to take active participation to raise a bar and play an important role in protection and preservation of seafarer's rights and freedoms. More importantly, the results of paper may be used for further research and development as the issues of protection and preservation of seafarers right is current, emerging challenge of global maritime industry.

The virus Covid-19 showed how fragile the whole system could be and where are gaps of whole legal instruments as well, however there is one question left – is maritime industry ready for new challenges or force – majeure situation to come in nearest future – at this stage, all is known is that collaboration between the decision makers, safeguard, proper interpretation and protection of relevant legal instrument and adequate action are highly needed for seafarers which run and make possible maritime business to work for the service of the society.

## REFERENCES

1. We would like to express our gratitude to Mirian Da Graca Camilo Mendes (Agreements Unit section at International Transport Worker's Federation, London) for empowering and providing her support during the course of working on this paper.
2. More action needed for seafarers, 'collateral victims' of measures to curb Covid-19, <https://news.un.org/en/story/2020/10/1074732>, [visited: 30.09.2021].
3. IMO, Circular Letter No.4204/Add.14/Rev.1, 5 October 2020. IMO Website "Coronavirus disease (COVID-19) Pandemic", <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Coronavirus.aspx> [visited: 30.09.2021].
4. ILO regarding the protection of seafarers' rights under the MLC, <https://www.ilo.org/global/standards/maritime-labour-convention/lang--en/index.htm>, [visited: 30.09.2021].
5. ICS, <https://www.ics-shipping.org/supporting-shipping/covid/>, [visited: 30.09.2021]
6. ITF Support Workers, <https://www.itfglobal.org/en/focus/covid-19>, [visited: 30.09.2021].

7. Maritime Labour Law Convention, 2006.
8. Aguilar v. Standard Oil Co., 318 U.S. 724 (1943).
9. *Vienna Convention on Consular Relations*, 1963.
10. Universal Declaration of Human Rights; 1965 International Convention on the Elimination of All Forms of Racial Discrimination; 1966 International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights; 1979 Convention on the Elimination of All Forms of Discrimination against Women; 1989 Convention on the Rights of the Child; 1990 International Convention on the Protection of the Rights of All Migrant Workers and Members of Their Families. 2006 Convention on the Rights of Persons with Disabilities.
11. The Right to Health, Fact Sheet No. 31, Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights and World Health Organization.
12. European Union Agency for Fundamental Rights (FRA) Fundamental Rights Report 2021 (Annual report), The Corona Virus Pandemic and Fundamental Rights.
13. Hebbbar A.A, Mukesh N. COVID-19 and seafarers' rights to shore leave, repatriation and medical assistance: a pilot study, *International Maritime Health*. 2020, 71(4), pp. 217; 223; 224, 227-228.
14. Doumbia-Henry C. Shipping and COVID-19: protecting seafarers as frontline workers. *WMU Journal Maritime Affairs*. 2020; 19(3); pp. 279, 293.
15. Wilhelmsen COVID-19 Global Port Restrictions Map – <https://www.wilhelmsen.com/ships-agency/campaigns/coronavirus/coronavirus-map/>.
16. General observation on matters arising from the application of the MLC, 2006 during the COVID-19 pandemic-Adopted by the CEACR at its 91st session, p. 2.
17. United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982.
18. Prölss A., *The United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS)*. Commentary, Hart Publishing | Oxford, United Kingdom, 2013, p. 710;
19. Geneva Declaration on Human Rights at Sea, 2019.
20. *Hirsi Jamaa v Italy*, App. № 27765/09 (ECtHR, 23 February 2012).
21. The COVID-19 related guidelines for ensuring a safe shipboard interface between ship and shore-based personnel were proposed based on consultation and active engagement of international organizations such as IMO: ICS, IAPH, BIMCO, IACS, IFSMA, IMPA, INTERTANKO, P&I Clubs, CLIA, INTERCARGO, Inter Manager, IPTA, FONASBA, WSC, International Maritime Employers' Council (IMEC) and the International Support Vessel Owners Association (ISOA).
22. IMO, Circular Letter No. 4204/Add. 4/Rev. 1, 28 May 2020; IMO, Circular Letter No.4204/Add. 14, op. cit, IMO. Circular Letter No. 4204/Add. 6, op. cit ; IMO establishes Seafarer Crisis Action Team, available at: [https://safety4sea.com/imo-establishes-seafarer-crisis-action-team/?\\_cf\\_chl\\_jschl\\_tk\\_\\_=pmd\\_cKG4EEH7K0hxGF2DRtniuDqomLxV86EyeqJnVwnD.8s-1634585916-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQdl](https://safety4sea.com/imo-establishes-seafarer-crisis-action-team/?_cf_chl_jschl_tk__=pmd_cKG4EEH7K0hxGF2DRtniuDqomLxV86EyeqJnVwnD.8s-1634585916-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQdl).
23. The Neptune Declaration on Seafarer Wellbeing and Crew Change, available <https://ft.unctad.org/wp-content/uploads/2021/01/The-Neptune-Declaration-on-Seafarer-Wellbeing-and-Crew-Change.pdf>; <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/11/Neptune-Declaration-Crew-Change-Indicator-November-2021.pdf>; the best practice <https://www.globalmaritimeforum.org/content/2021/05/The-Neptune-Declaration-Best-Practices-for-Charterers.pdf>.
24. Information notes on maritime labour issues and coronavirus (COVID-19) Revised version 3.0, available at: [https://www.ilo.org/global/standards/maritime-labour-convention/WCMS\\_741024/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/global/standards/maritime-labour-convention/WCMS_741024/lang--en/index.htm).
25. International Medical Guide for Ships, available at: [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43814/9789240682313\\_eng.pdf;jsessionid=9730A9B7BA7A7D1B6EA30CA8A2AA0E29?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/43814/9789240682313_eng.pdf;jsessionid=9730A9B7BA7A7D1B6EA30CA8A2AA0E29?sequence=1).
26. Guidance on Personal Protective Equipment (PPE), available <https://www.cdc.gov/vhf/ebola/healthcare-us/ppe/guidance.html>.

27. Circular No. 18/CIRC/STCW.
28. Maritime Transport Agency, <https://mta.gov.ge/?m=9> [Last visit 10.12.2021].
29. On certain measures to be taken in the Georgian seafarers' certification and training system in connection of the spread of the novel coronavirus COVID-19. Director of Maritime Transport Agency of the Ministry of Economy and Sustainable Development of Georgia, Order N5, April 6 2020.
30. Maritime Human Rights Risks and the Covid -19 crew change crisis: A tool to support human rights due diligence, available: <https://www.ohchr.org>.

**Мгеладзе М., Сурманідзе Г. ПРОБЛЕМИ І ВПЛИВ COVID-19 НА ПРАВА І СВОБОДИ МОРЯКІВ**

*У цій статті обговорюється важливість захисту прав і свобод моряків і забезпечення дотримання міжнародних протоколів, в яких моряки визначаються в якості ключових працівників і розглядаються проблеми і досвід, накопичений в рамках Covid-19, в якості важливого фактора вдосконалення міжнародно-правових документів. Тому вкрай важливо зосередити увагу на правах моряків і розробити відповідні інструменти, ефективні, орієнтовані на досягнення цілей належним чином, продумані плани дій і механізми, підвищення глобальної обізнаності про порушення прав людини на морі і забезпечення позитивних змін за допомогою розробки законодавства і політики, обмін думками і передовою практикою в галузі захисту прав моряків, незважаючи на ситуації COVID-19.*

*Для цих цілей у представленій статті досліджується нова виникаюча проблема світового морського суспільства, така як захист, збереження і забезпечення прав моряків на під час COVID-19. У цьому зв'язку, в цій статті розглядаються відповідні міжнародно-правові документи, такі, як UNCLOS, 1982, MLC, 2006 і права людини. У цій статті також описано реакцію морської промисловості на наслідки спричинені COVID-19. У кінці статті містяться висновки та рекомендації.*

© Мгеладзе М., Сурманідзе Г.

Статтю прийнято  
до редакції 28.11.21

## РОЗВИТОК ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

**Клевцов К. М.**, д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: klevtsovka@i.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

**Сапронов О. О.**, д.т.н., доцент, заступник завідувача кафедри, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;

**Акімов О. В.**, к.т.н., доцент, декан факультету суднової енергетики, доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: akimoffsasha@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-8613-2837;

**Васильченко Г. Ю.**, к.пед.н., доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vasilchenkogenadii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8320-4441.

*У роботі розглянуто основні напрямки негативного впливу логістичних систем на навколишнє природне середовище. Висвітлено основні підходи до екологізації логістичних процесів у ланцюжках постачання. Проведено теоретичний аналіз основних проблем екологічного характеру функціонування логістичної системи України та визначено перспективи їх вирішення.*

*Досліджено класифікацію екологічних збитків, відповідно до якої екологічні збитки навколишньому середовищу можуть бути завдані трьома базисними джерелами. Першим джерелом є саме транспортний засіб, який отримав пошкодження. Типовими прикладами у разі виступають поломки транспортних засобів, внаслідок яких або паливно-мастильні матеріали (ПММ), або вантаж не санкціоновано взаємодіють із довкіллям. Управління цим видом ризиком може здійснюватися у кількох напрямках. Визначено необхідність знижувати ймовірність настання подібних ситуацій, впливаючи на такі фактори, як рівень зносу матеріально-технічної бази транспортних підприємств. Так як повне виключення можливості реалізації подібних ризикових ситуацій надмірно затратне, необхідно знижувати можливі наслідки реалізації цих ризиків. Знижувати та/або компенсувати ці наслідки можна за допомогою створення спеціалізованих транспортних магістралей, що уникають зіткнення з навколишнім середовищем, створенням системи транспортної підтримки, яка дозволить оператору рухомого складу в найкоротший термін отримати кваліфіковану допомогу в ремонті та багато іншого. Наступним джерелом ризику є транспортні ємності. Внаслідок пошкодження транспортних ємностей екологічні збитки можуть бути завдані за допомогою взаємодії вантажу та навколишнього середовища.*

*У роботі розроблено ренкінг екологічних ризиків логістичного процесу за сукупним рівнем потенційної шкоди. Наведений ренкінг є базовим класифікатором з метою розробки системи індикаторів, що характеризують стійкість логістичного процесу. Дані індикатори повинні кількісно відображати ймовірність реалізації наведених екологічних ризиків, а також кількісно відображати рівень потенційних збитків, але при цьому мають ґрунтуватися виключно на об'єктивній кількісній інформації, що характеризує логістичний процес.*

**Ключові слова:** екологістика; екологічна концепція логістичної діяльності; логістична система; ланцюжок поставок; логістичні процеси.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.018-027**

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день існує ряд обмежень, які заважають планомірному розвитку людства. Однак, як основну, слід розглядати глобальну екологічну проблему, яка об'єднує світове співтовариство на шляху до її вирішення. І оскільки стан навколишнього середовища погіршується виключно внаслідок діяльності людей, пов'язаних із виробництвом та доставкою суспільних благ, на екологічні принципи мають бути орієнтовані й логістичні ланцюжки поставок. Результатом взаємодії їх учасників, окрім досягнення традиційних економічних цілей, має стати забезпечення високого безпечного рівня всіх логістичних процесів. Першочерговими для України є вивчення та вирішення проблем взаємозв'язку логістичної діяльності та навколишнього

середовища, оскільки ми зацікавлені в досягненні високого рівня конкурентоспроможності логістичної галузі з найбільш повним використанням її потенціалу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Логістичні дослідження екологічних питань присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних вчених, серед яких: Машак Н. М. [1], Маргіт Н. О. та Білоніжка У. З. [2], Смірнов І. Г. [3], Чеклов В. Ф. [4], Тутов С. [5], Брдулак Н. [6], Гаджинский А. М. [7] та інші. У достатній кількості публікуються звіти міжнародних та національних організацій, що відображають реальний стан довкілля та вплив на нього різних видів економічної діяльності. Разом з тим, не повністю освітленими залишаються питання екологічності ланцюжків поставок, підходів до управління ними на основі екологічних принципів.

**Мета роботи** – дослідження розвитку науково-методичних та прикладних аспектів щодо вдосконалення державного регулювання логістичних процесів з урахуванням охорони навколишнього середовища та прогнозування екологічних ризиків згідно з концепцією сталого розвитку країни.

**Матеріали та методика дослідження.** Дослідження методології сталого розвитку логістичних процесів, дозволило констатувати, що ключовою гілкою управління цих процесів є екологічна. Управління стійкістю соціального та економічного розвитку насамперед пов'язане з процесом управління безпосередньо процесом транспортування сировини, виробництва матеріалів та споживання різних товарів. Екологізація галузі сталого розвитку є лише частково керованою, стосовно логістичним процесам, оскільки фізичним відображенням цього процесу управління виступає прогнозування екологічних ризиків, які власними силами є комплексним об'єктом управління. Екологічні ризики зумовлені ймовірністю негативних проявів природних сил у процесі логістичної діяльності. Але з іншого боку, екологічні ризики виражаються у ймовірності впливу логістичного процесу на навколишнє середовище. Реалізація екологічного ризику призводить до шкоди для природи та суспільства. Відповідно до концепції сталого розвитку, вектор наслідків реалізації екологічних ризиків є чітко визначеним, а саме спрямованим на навколишнє середовище. Отже, саме наслідки впливу логістичних процесів на навколишнє середовище і будуть виступати об'єктами управління в алгоритмі, що розробляється.

У рамках управління безпосередньо логістичними процесами екологічні ризики можуть бути класифіковані відповідно до 2-х базових класифікаційних ознак:

1. Джерело ризику (RES). Під джерелом ризику розуміється елемент логістичного процесу, що є першопричиною екологічних наслідків реалізації ризикової події.
2. Об'єкт реалізації ризику (OES). Під об'єктом реалізації ризику розуміється конкретний елемент навколишнього (екологічного) середовища, якому було завдано шкоди внаслідок реалізації ризикової події.

Класифікація екологічних ризиків логістичних процесів відповідно до RES представлена на рис. 1 [8].

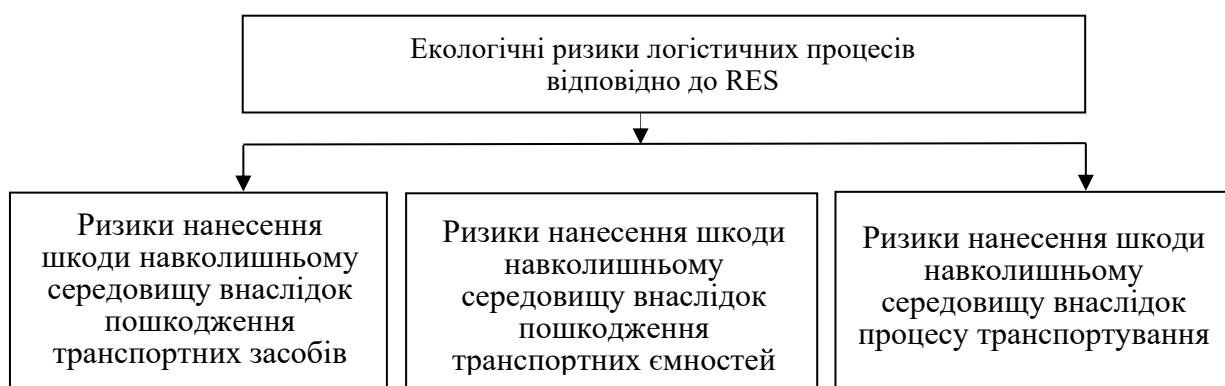


Рисунок 1 – Класифікація екологічних ризиків логістичних процесів відповідно до RES

Як можна зробити висновок, відповідно до даної класифікації, екологічні збитки навколишньому середовищу можуть бути завдані трьома базисними джерелами. Першим джерелом є саме транспортний засіб, який отримав пошкодження. Типовими прикладами у разі виступають поломки транспортних засобів, внаслідок яких або ПММ, або вантаж не санкціоновано взаємодіють із довкіллям. Управління цим видом ризиків може здійснюватися у кількох напрямках. Насамперед необхідно знижувати ймовірність настання подібних ситуацій, впливаючи на такі фактори, як рівень зносу матеріально-технічної бази транспортних підприємств. Так як повне виключення можливості реалізації подібних ризикових ситуацій надмірно затратне, необхідно знижувати можливі наслідки реалізації цих ризиків. Знижувати та/або компенсувати ці наслідки можна за допомогою створення спеціалізованих транспортних магістралей, що уникають зіткнення з навколишнім середовищем, створенням системи транспортної підтримки, яка дозволить оператору рухомого складу в найкоротші терміни отримати кваліфіковану допомогу в ремонті та багато іншого. Наступним джерелом ризику є транспортні ємності. Внаслідок пошкодження транспортних ємностей екологічні збитки можуть бути завдані за допомогою взаємодії вантажу та навколишнього середовища.

Завершальним джерелом небезпеки є процес транспортування. У першу чергу це виражається у відходах, що формуються в рамках даного процесу (викиди CO<sub>2</sub>, технічної рідини, що скидається, тощо). Збитки в даному випадку мають перманентний характер, і можуть бути виключно компенсовані. Ключовими елементами державного регулювання у разі можуть бути фіскальні інструменти, прив'язані до рівня екологічності палива та інших елементів логістичного процесу. Як приклад можна навести диференціацію транспортного податку для електротранспорту та транспорту, що функціонує за допомогою ДВЗ на альтернативних джерелах енергії.

Наведена класифікація дозволяє диференціювати екологічні збитки залежно з його джерела, у межах логістичних процесів. Диференціація екологічних збитків з погляду векторів наслідків представлена на рис. 2 [8].

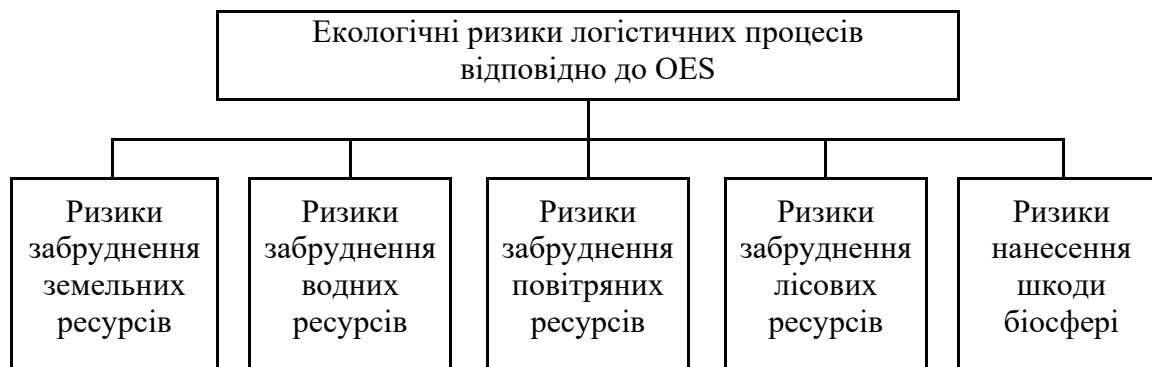


Рисунок 2 – Класифікація екологічних ризиків логістичних процесів відповідно до OES

Відповідно до цієї класифікації екологічні збитки диференційовані за ключовими елементами навколишнього середовища. Насамперед необхідно розглянути ризики забруднення земельних ресурсів. Цей вид передбачає втрату хімічних та фізичних властивостей земельних ресурсів, спричинених контактом з паливними елементами, ПММ або небезпечними вантажами. Згідно з наведеним визначенням, можна зробити висновок, що джерелом шкоди в даному випадку в першу чергу виступають пошкоджені транспортні засоби та транспортні ємності. Незважаючи на те, що значні викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу та/або інші відходи процесу транспортування при певній концентрації можуть викликати забруднення земельних ресурсів, цим збитком можна знехтувати. Ключовою небезпекою даних забруднень є втрата хімічних властивостей ґрунту, що неминуче призводить до втрати родючості та подальшого забруднення лісових ресурсів та заподіяння шкоди біосфері.

Далі розглянемо забруднення водних ресурсів. Ключові збитки від забруднення водних ресурсів виражаються у зниженні біосфери порушених акваторій, потенційному скороченні джерел прісної питної води, а також потенційному забрудненню земельних та лісових ресурсів у місцях їх дотику. Незважаючи на те, що ключову небезпеку для водних ресурсів є логістичні процеси, забезпечені водним транспортом, пошкодження транспортних ємностей або рухомого складу поблизу акваторій також потенційно можуть бути джерелом забруднення. Відходи самого процесу транспортування у разі теж можуть завдати шкоди. Зокрема йдеться про скидання технічних вод в акваторії, що є природним процесом для більшої частини вантажного водного транспорту. Регулювання цього процесу може здійснюватися за допомогою зонування транспортних коридорів та виділення спеціалізованих областей для скидання.

Далі слід розглянути ризики забруднення повітряних ресурсів. У разі даних ризиків, основним джерелом шкоди є безпосередньо сам процес транспортування. Незважаючи на те, що витік ПММ або інших небезпечних вантажів також може спричинити забруднення повітряних ресурсів, основну шкоду завдають безпосередньо викиди CO<sub>2</sub> та інших відходів процесу переробки палива, що згоряють в атмосфері. Знижувати даний обсяг викидів можна шляхом переходу на більш екологічно-стійкий транспорт (як електричний транспорт, так і гібридний транспорт, транспорт, що працює на природному газі або підвищеного екологічного класу), а також скорочення відстаней і простоїв, внаслідок чого витрата палива (а отже, та викидів) буде знижуватися. Далі слід розглянути ризики забруднення лісових ресурсів. Насамперед слід зазначити, що реалізація даних ризиків є наслідком реалізації ризиків забруднення земельних ресурсів.

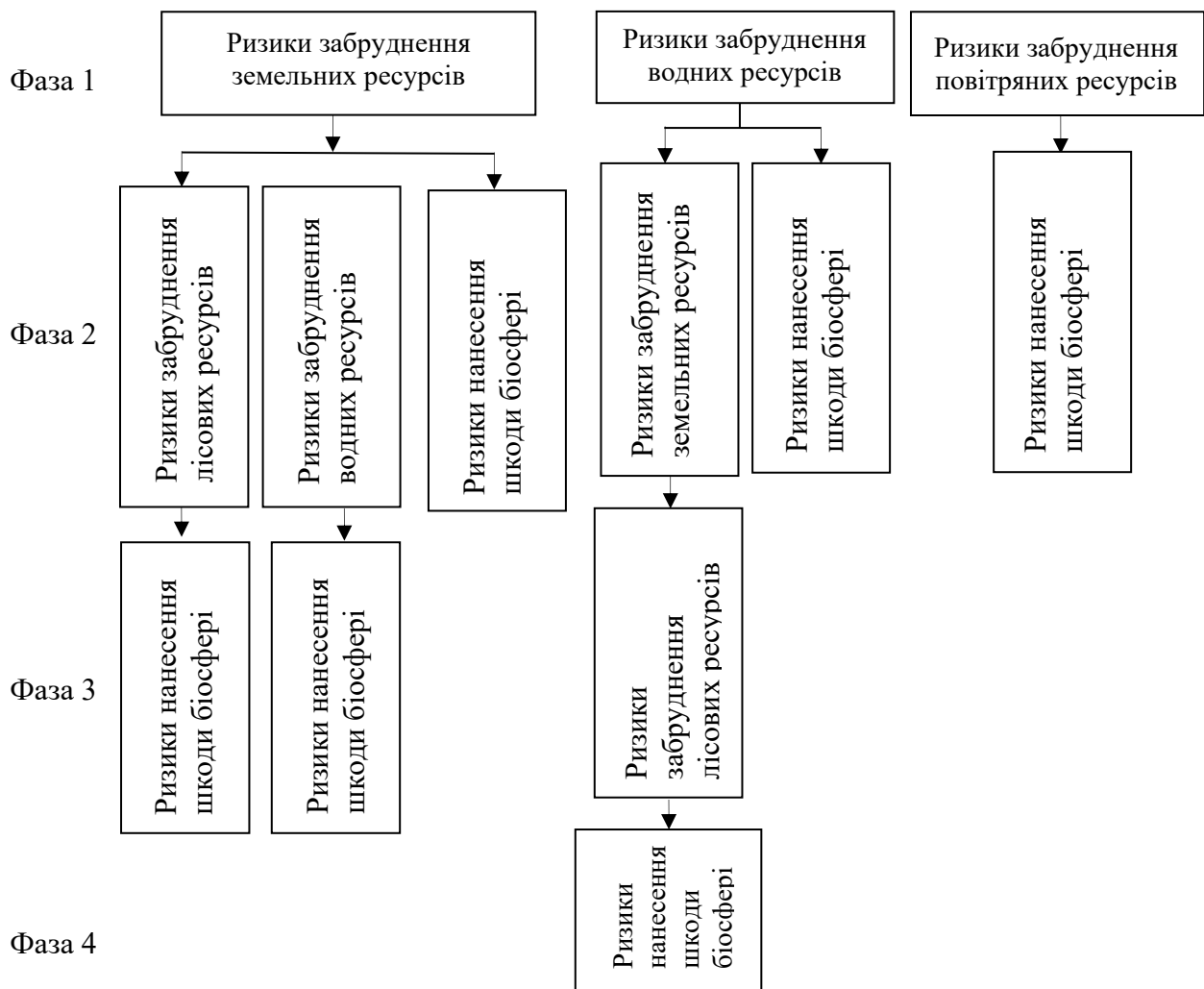


Рисунок 3 – Схема послідовної реалізації ризиків логістичних процесів, диференційованих відповідно до OES [8]

Базовий потенційний збиток від цих ризиків виявляється у не відтворюваності лісових ресурсів, і навіть у потенційній шкоді біосфері. Ключові джерела збитків у разі ідентичні джерелам збитків від реалізації ризиків забруднення земельних ресурсів. Одним із ключових напрямів управління ймовірністю настання цього ризику може бути прокладання транспортних маршрутів поза лісовими ресурсами.

На завершення розглянемо ризики заподіяння шкоди біосфері. Реалізація цих ризиків є наслідком реалізації ризиків однієї чи кількох попередніх груп. При цьому потенційна шкода від реалізації цих ризиків є найбільшою. Збитки біосфері може бути завдано будь-яким із виділених раніше джерел. Ключовими напрямками управління шкодою може бути як прокладання транспортних маршрутів в обхід найбільш цінних областей біосфери, і зниження обсягу викидів загалом. Наведені групи ризиків можуть бути наслідком один одного. Отже, для визначення пріоритетності управління ймовірністю реалізації необхідно логічно формалізувати можливі послідовності. На рис. 3 наведено блок-схему послідовної реалізації ризиків логістичних процесів, диференційованих відповідно до OES.

Як можна побачити на (рис. 3), у межах даної послідовності можна виділити 4 типові фази. У рамках першої фази наведено первинні напрямки заподіяння шкоди екологічному середовищу. Даних напрямів всього 3 із 5 існуючих. Заподіяння шкоди біосфері та/або лісовим ресурсам неможливо поза заподіянням шкоди земним, водним чи повітряним ресурсам. Отже, з погляду напрямів управління ймовірністю реалізації, саме 3 даних види ризиків будуть пріоритетними. Друга фаза є найбільш наповненою та відображає можливі наслідки реалізації ризиків першої фази. Як бачимо, найімовірнішим є завдання шкоди біосфері. Цей факт обумовлений тим, що біосфера є невід'ємною частиною навколишнього середовища, збитки якої завдають за результатами реалізації ризиків першої фази. Слід зазначити, що у другій фазі відсутні ризики забруднення повітряних ресурсів. Це зумовлено диференціацією джерел збитків, описаних раніше. Третя фаза розкриває можливі наслідки другої фази. Як бачимо, у межах третьої фази також превалює збитки біосфері. Четверта фаза є завершальною, і наслідки її реалізації найменш ймовірні.

Наведена схема дозволяє ранжувати можливі наслідки від наведених видів ризиків.

**Результати досліджень та їх обговорення.** У разі оцінювання розміру шкідливих наслідків передбачається визначити їх як у кількісних категоріях (площа зараження, кількість потрошених природних об'єктів тощо), так і у якісних (характер зараження тощо). В економічній інтерпретації альтернативно можливих кількісних та якісних категорій може виступати дисконтована вартість заходів щодо відновлення пошкоджених екологічних об'єктів (1) [9]:

$$B_{ек} = C_t + \sum_t^T \frac{C_n}{(1+r)^t}, \quad (1)$$

де  $C_t$  – вартість заходів щодо відновлення пошкоджених екологічних об'єктів у поточному періоді;  $C_n$  – вартість заходів у наступних періодах;  $T$  – кількість періодів;  $r$  – ставка дисконту з розрахунку на період.

Припустимо, що  $B_{ек}$  ідентична кожному з встановлених видів ризиків логістичних процесів, диференційованих відповідно до OES. Дане припущення є справедливим, так як усереднене дельта даного показника для кожного з виділених напрямків є досить значним, що дозволяє знехтувати порівняльними відхиленнями. У той же час, функція, що описує ймовірність настання кожної нової фази є спадною. У разі даного дослідження слід припустити, що це функція лінійно спадна. Таким чином, рівень потенційної шкоди від реалізації того чи іншого ризику може бути визначений наступним чином (2) [9]:

$$P_x = \sum_1^4 \frac{lx}{n}, \quad (2)$$

де  $P_x$  – рівень потенційної шкоди від реалізації ризику  $x$ , диференційованого відповідно до OES (бал);  $lx$  – число появи виду ризику  $x$ , диференційованого відповідно до OES, у фазі  $n$ ;  $n$  – номер відповідної фази.

Відповідно до наведеної формули (2) виправлено загальні приватні рівні потенційної шкоди від реалізації наведених ризиків (табл. 1).

Таблиця 1 – Рівень потенційних збитків від реалізації наведених ризиків [10–12]

	Фаза 1	Фаза 2	Фаза 3	Фаза 4	Сума
Ризики забруднення земельних ресурсів	1,00	0,50	0,00	0,00	1,50
Ризики забруднення водних ресурсів	1,00	0,50	0,00	0,00	1,50
Ризики забруднення повітряних ресурсів	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Ризики забруднення лісових ресурсів	0,00	0,50	0,33	0,00	0,83
Ризики нанесення шкоди біосфері	0,00	1,50	0,67	0,25	2,42
Сума	3,00	3,00	1,00	0,25	

Як бачимо, з погляду потенційної шкоди, найбільш значущими є перша і друга фаза. При цьому, якщо в рамках першої фази умовний внесок у сукупний збиток рівномірно розподілений між ризиками забруднення земельних, водних та повітряних ресурсів, у рамках другої фази ключова роль безперечно відведена ризикам заподіяння шкоди біосфері. При цьому дана роль зберігається в рамках третьої та четвертої фази. Показник  $P$  для кожного з видів ризику визначено сумою балів у всіх фазах. На рис. 4 наведено ренкінг екологічних ризиків логістичних процесів відповідно до OES за сукупним рівнем потенційної шкоди.

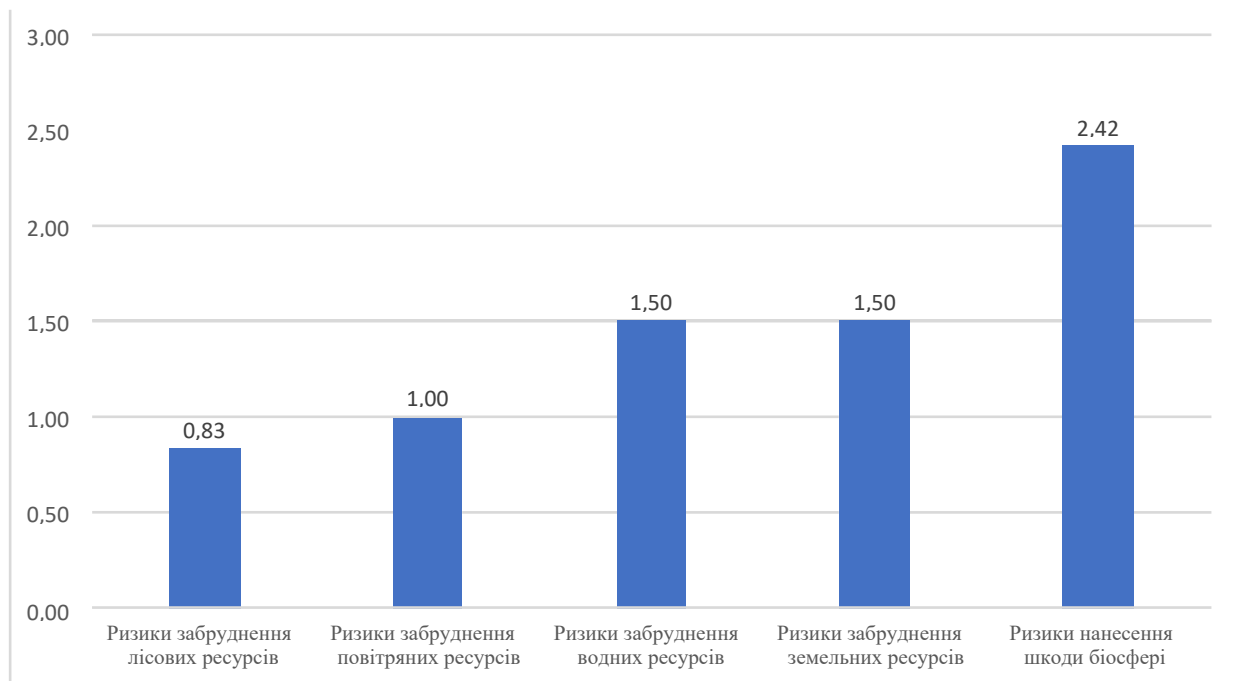


Рисунок 4 – Ренкінг екологічних ризиків логістичних процесів відповідно до OES за сукупним рівнем потенційної шкоди (бали) [13]

Відповідно до наведеного ренкінгу (рис. 4) Капустина Л. М. висловила, що ризик заподіяння шкоди біосфері є пріоритетним. Однаково пріоритетними є ризики забруднення водних ресурсів та ризики забруднення земельних ресурсів. Далі йдуть ризики забруднення повітряних ресурсів, що також визначається специфікою їх джерела. Останню позицію займають ризики забруднення лісових ресурсів, що є не так важливо, стосовно ризиків забруднення земельних ресурсів [14].

Н. П. Карпова дала свою оцінку, та стверджує, що незважаючи на сформований рейтинг, не можна забувати, що з точки зору управління ймовірністю реалізації значущими є виключно ризики першої фази, а саме ризики забруднення земельних ресурсів, ризики забруднення повітряних ресурсів та ризики забруднення водних ресурсів. Формування універсального рейтингу даних ризиків неможливо, оскільки наведені критерії рівнозначні з погляду пріоритетності управління, і навіть диференційовані з погляду інструментарію управління [15].

**Висновки.** Основні чинники екологізації логістичної діяльності сьогодні не можуть ігнорувати ні окремі учасники ланцюжків постачання сировини та продукції, ні держава у процесі побудови та розвитку своєї логістичної системи. Результати проведеного дослідження свідчать про численні прояви невідповідності логістичної системи України міжнародним екологічним стандартам та вимогам, зокрема рівню екологічності логістичної діяльності у країнах ЄС. Тому, для досягнення стратегічної мети – забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної логістичної галузі, об'єктивною необхідністю є орієнтація законодавчих ініціатив, економічних та організаційних умов діяльності, соціальних важелів впровадження передового світового досвіду та інноваційних рішень у сфері екологізації логістичної діяльності.

У рамках управління безпосередньо логістичними процесами екологічні ризики були класифіковані відповідно до 2 базових класифікаційних ознак: Джерело ризику (RES) та Об'єкт реалізації ризику (OES).

Наведені групи ризиків можуть бути наслідком один одного. Отже, з метою визначення пріоритетності керування ймовірністю реалізації були логічно формалізовані можливі послідовності у вигляді блок-схеми послідовної реалізації ризиків логістичних процесів, диференційованих відповідно до об'єкта реалізації ризику. Ця схема дозволяє ранжувати можливі наслідки від наведених видів ризиків.

У роботі розроблено рейтинг екологічних ризиків логістичного процесу за сукупним рівнем потенційної шкоди. Наведений рейтинг є базовим класифікатором з метою розробки системи екологічних індикаторів, що характеризують екологічну стійкість логістичного процесу. Дані індикатори повинні кількісно відображати ймовірність реалізації наведених екологічних ризиків, а також кількісно відображати рівень потенційних збитків, але при цьому мають ґрунтуватися виключно на об'єктивній кількісній інформації, що характеризує логістичний процес в цілому.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Машак Н. М. Стратегічна узгодженість логістичної діяльності підприємства на екологічних засадах. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2011. № 4. Т. II. С. 273–282. URL: [http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2011\\_4\\_2\\_273\\_282.pdf](http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2011_4_2_273_282.pdf).
2. Маргіта Н. О., Білоніжка У. З. Сучасні тенденції впровадження “зеленої” логістики. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2014. № 1. С. 279–285. URL: [http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2014\\_1\\_279\\_286.pdf](http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/sites/default/files/mmi2014_1_279_286.pdf).
3. Смирнов І. Г. Геоекоекологічна орієнтація управління логістикою виробничосервісних систем. *Часопис соціально-економічної географії*. 2013. № 2. Т. 15. С. 11–16. URL: <https://periodicals.karazin.ua/soccongeo/issue/view/119/539>.
4. Чеклов В. Ф., Чеклова В. М. Передумови розвитку “зеленої” логістики на залізничному транспорті. *Technology audit and production reserves*. 2014. № 1/3 (15). С. 43–45 URL: [http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/rbis\\_nbuvcgiirbis\\_64.exe?c21com=2&i21dbn=ujrn&p21dbn=ujrn&image\\_file\\_download=1&Image\\_file\\_name=PDF/Tatrv\\_2014\\_1.3\\_19.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/rbis_nbuvcgiirbis_64.exe?c21com=2&i21dbn=ujrn&p21dbn=ujrn&image_file_download=1&Image_file_name=PDF/Tatrv_2014_1.3_19.pdf).
5. Тутов С. *Нелогічна логістика України*. URL: <http://racurs.ua/ua/1574nelogichna-logistyka-ukrayiny>.
6. Brdulak H., Michniewska K. Zielona logistyka, ekologistyka, zrownowazony rozwoj w logistyce. *Koncepcje i strategie logistyczne. Logistyka*. 2009. № 4. Р. 8–15.
7. Гаджинский А.М. *Проектирование товаропроводящих систем на основе*

логистики : учебник. Москва : Изд-во «Дашков и Ко», 2012. 324 с.

8. Гаррисон А. *Логистика. Стратегия управления и конкурентирования через цепочки поставок* : учебник. Москва : Изд-во «Дело и сервис», 2010. 368 с.

9. Гвилия Н. А. *Логистическая координация в корпорациях и кластерах* : монография. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭУ, 2016. 103 с.

10. Григорян М. Г., Кононова Г. А. Ключевые позиции процесса управления организационными изменениями в логистическом бизнесе. *Логистика и управление цепями поставок*. 2018. №3 (86). С. 47–54.

11. Долгов А. П., Козлов В. К., Уваров С. А. *Логистический менеджмент. Концепция логистики фирмы* : учебное пособие. Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов. 2005. 264 с.

12. Дудин М. Н., Комков Н. И., Лясников Н. В. «Зелёная» логистика как инструмент обеспечения экологической безопасности институционально-инновационного недропользования Европейской Арктики. *Мир*. 2016. Т. 7. № 3 (27). С. 8–17.

13. Зингер О. А., Ильясова А. В. Факторы, влияющие на устойчивое развитие промышленных предприятий. *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1. С. 8–10.

14. Капустина Л.М. «Зеленые» технологии в логистической деятельности. *Известия Уральского государственного экономического университета*. 2016. № 2 (64). С. 114–122.

15. Карпова Н. П., Пилипович Е. Д. Экологическая логистика как основа стратегии устойчивого развития компании. *Экономические науки*. 2016. №2 (23). С. 79–81.

## REFERENCES

1. Mathak N. M. (2011). Strategichna yzgodzhenistj logistichnoi dialjnosti pidprjemstva na wkologichnjx zasadaх. *Marketing I menedzhment inovatsiyj*. vol. 4. Т II. 273–282.

2. Magrita N. O., Bilonigka U.Z. (2014). Sychasni tendentsii vprovadgennia “zelenoyj” logistiki. *Marketing I menedzhment inovatsiyj*. vol. 1. 279–285.

3. Smirnov I. G. (2013). Geoekologichna orientatsia upravlinnia logistikou vjrobnjchoservisnjx sisnem. *Chasopjs sotsialnoi geografii*. vol. 2. T15. 11–16.

4. Cheklov V. F., Cheklova V.M. (2014). Peredumovih rozvihitky “zelenoyj” logistiki yf zaliznihchnomy transporti. *Technology audit and production reserves*. vol. 1/3(15). 43–45.

5. Tytov S. *Nelogichna logistika Ykrajnj*. URL : <http://racurs.ua/ua/1574nelogichna-logistyka-ukrayiny>.

6. Brdulak H., Michniewska K. (2009). Zielona logistyka, ekologistyka, zrownowazony rozwoj w logistyce. *Koncepcje i strategie logistyczne. Logistyka*. vol. 8–15.

7. Gaddzhinskiy A. M. (2012). *Proektirovanie tovaroprovodiatjix system na osnove logistiki: ychebnik*. Moskva : Izdat-vo “Dashkov & Ko”. p. 324.

8. Garrison A. (2010). *Logistika. Strategia upravlenia I konkyrirovania cherez tseepochki postavok*: ychebnik. Moskva : Izdat-vo “Delo I servis”. p. 368.

9. Gvilia N. A. (2016). *Logisticheskaia koordinatsia v korporatsiax i klasterax* : monografia. Izdat-vo “SPbGY”. p. 103.

10. Grigorian M. G. (2018). Kluchevie pozitsii protsessa upravlenia organizatsionnijmi izmeneniami v logisticheskom biznese. *Logistika i upravlenie tsepiami postavok*. vol. 3(86). 47–54.

11. Dolgov A. P. (2005). *Logisticheskij menedzhment. Kontseptsia logistiki firmih*: Ychebnoe posobie. Izdat-vo SPb Sanct-Peterbyrdzhzkogo gosydarstvennogo yuniversiteta ekonomiki I finansov. p. 264.

12. Dydin M. N. (2016). “Zelenaia” logistika kak instrymet obespechnia ekologichescyj bezopasnosti institytsionaljno-innovatsionnogo nedropoljzovania. *Evropejskoyj*

*Arktiki*. vol. 3(27). Т. 7. 8–17.

13. Zinger O. A. (2015). Faktorih, vliiautnie na ystoyjchivoe razvitie promihchlennih predpriatiyj. *Sovremennihe problemih nayki I obrazovania*. vol. 1–1. 8–10.

14. Kapystina L. M. (2016). “Zekenihe” texnologii v logisticheskoyj deiatel'nosti. *Izvestia Yrakjskogo gosydarstvennogo ekonomicheskogo univertsiteta*. vol. 2(64). 114–122.

15. Karpov N. P. (2016). Ekologicheskaja logistika kak osnova strategii ystoyjchivogo razvitia kompanii. *Ekonomicheskie nayki*. vol. 2(23). 79–81.

**Клевцов К. Н., Сапронов А. А., Акимов А. В., Васильченко Г. Ю. РАЗВИТИЕ ЭКОЛОГИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

*В работе рассмотрены основные направления влияния логистических систем на окружающую природную среду. Освещены главные подходы к экологизации логистических процессов в цепочках поставок. Проанализированы основные проблемы экологического характера функционирования логистической системы Украины и определены перспективы их решения.*

*Разработана классификация экологического ущерба, в соответствии с которой, экологический ущерб окружающей среде может быть нанесен тремя базисными источниками. Первым источником является само транспортное средство, получившее повреждение. Типовыми примерами в данном случае выступают поломки транспортных средств, вследствие которых либо ГСМ, либо груз не санкционировано взаимодействуют с окружающей средой. Управление данным видом риском может осуществляться в нескольких направлениях. В первую очередь необходимо снижать вероятность наступления подобных ситуаций, воздействуя на такие факторы как уровень износа материально-технической базы транспортных предприятий. Так как полное исключение возможности реализации подобных рисков ситуаций чрезмерно затратное, необходимо снижать возможные последствия от реализации данных рисков. Снижать и/или компенсировать данные последствия можно посредством создания специализированных транспортных магистралей, избегающих соприкосновения с окружающей средой, созданием системы транспортной поддержки, которая позволит оператору подвижного состава в кратчайшие сроки получить квалифицированную помощь в ремонте и многое другое. Следующим источником риска являются транспортные емкости. Вследствие повреждения транспортных емкостей экологический ущерб может быть нанесен посредством взаимодействия груза и окружающей среды. Завершающим источником опасности является сам процесс транспортировки.*

*В работе разработан рейтинг экологических рисков логистического процесса по совокупному уровню потенциального ущерба. Приведенный рейтинг является базисным классификатором для целей разработки системы индикаторов, характеризующих устойчивость логистического процесса. Данные индикаторы должны количественно отражать вероятность реализации приведенных экологических рисков, а также количественно отражать уровень потенциального ущерба, но при этом должны основываться исключительно на объективной количественной информации, характеризующий логистический процесс.*

**Ключевые слова:** экологистика; экологическая концепция логистической деятельности; логистическая система; цепочка поставок; логистические процессы.

**Klevtsov K., Sapronov O.O., Akimov O. V., Vasylichenko H. Yu. DEVELOPMENT OF GREENING OF TRANSPORT AND LOGISTICS ACTIVITIES**

*The paper considers the main directions of the negative impact of logistics systems on the environment. The main approaches to the greening of logistics processes in supply chains are highlighted. Theoretical analysis of the main problems of ecological character of functioning of logistic system of Ukraine is carried out and prospects of their decision are defined.*

*The classification of ecological damages according to which ecological damages to environment can be caused by three basic sources is investigated. The first source is the vehicle that was damaged. Typical examples in this case are vehicle breakdowns, as a result of which either fuels and lubricants (fuel) or cargo do not interact with the environment without authorization. This type of risk can be managed in several ways. The need to reduce the probability of such situations by influencing such factors as the level of wear of the material and technical base of transport enterprises is determined. Since the complete exclusion of the possibility of realization of such risk situations is excessively expensive, it is necessary to reduce the possible consequences of the realization of these risks. These effects can be reduced and / or offset by the creation of specialized highways that avoid collisions with the environment, the creation of a transport support system that will allow the rolling stock operator to receive qualified repair assistance in the shortest possible time, and much more. The next source of risk is transport tanks. Damage to transport tanks can cause environmental damage through the interaction of cargo and the environment.*

*The paper develops a ranking of environmental risks of the logistics process by the total level of potential damage. The given ranking is a basic classifier for the purpose of development of the system of the indicators characterizing stability of logistic process. These indicators should quantify the probability of realization of these environmental risks, as well as quantify the level of potential losses, but should be based solely on objective quantitative information that characterizes the logistics process.*

**Keywords:** ecology; ecological concept of logistics activity; logistics system; supply chain; logistics processes.

© Клевцов К. М., Сапронов О. О., Акімов О. В., Васильченко Г. Ю.

Статтю прийнято  
до редакції 12.11.21

*ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ*

*ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY*

## ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ТЕПЛОСТІЙКИХ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ І ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Букетов А. В.**, *д.т.н., професор, завідувач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: buketov@tntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9836-3296;*

**Кулініч В. Г.**, *викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: kulinich2000@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-0323-8236;*

**Кулініч В. В.**, *старший викладач кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, e-mail: victorykulinich@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6764-7886;*

**Сметанкін С. О.**, *PhD, старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: rabota.hdma.10@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9658-2492;*

**Палагній В. І.**, *старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, e-mail: vpalagniy@ukr.net.*

*Розроблено два нових композитних матеріали і покриття на їх основі, які впроваджені у ПП «Інтелектуальні морські технології» м. Миколаїв. Даний результат забезпечує підвищення довговічності деталей засобів морського та річкового транспорту за рахунок підвищеної теплостійкості та корозійної стійкості розроблених полімерних композитних матеріалів та захисних покриттів на їх основі. Підвищення корозійної стійкості досягнуто за допомогою використання захисного полімеркомпозитного покриття на основі епоксидного діанового олігомеру ЕД-20, модифікованого 3,3-дихлор-4,4-діамінодифенілметаном, наповненого полістиролом «Оазис» та затвердженого поліетиленполіаміном ПЕПА. Введення до епоксидного зв'язувача таких інгредієнтів дозволяє підвищити показники руйнівних напружень при згинанні епоксикомпозитів від  $\sigma_{z2} = 48,0$  МПа (для епоксидної матриці) до  $\sigma_{z2} = 110,6$  МПа. Захисне покриття виокремлюється підвищеною когезійною міцністю, що забезпечує сповільнення проникності агресивних середовищ у об'єм розробленого епоксикомпозиту. Формування захисного покриття із підвищеною теплостійкістю забезпечено шляхом введення в сполучне модифікатора 4,4-діамінодифенілметану, наповнювача полістирола «Оазис» та твердника ПЕПА. За такого вмісту забезпечено формування композитних матеріалів із поліпшеними показниками теплостійкості від  $T = 341$  К (для епоксидної матриці) до  $T = 355$  К. Отримані фізико-механічні, теплофізичні властивості та корозійна стійкість розроблених матеріалів порівняні із відомими світовими аналогами. Це є неопосередкованим свідченням їх конкурентоспроможності на світовому ринку. Слід зазначити, що розроблені захисні покриття дозволили збільшити показники руйнівних напружень при згинанні у 2,0...2,3 рази, а корозійної стійкості у 1,6 разів порівняно із немодифікованою епоксидною матрицею.*

**Ключові слова:** епоксидний олігомер, покриття, модифікатор, наповнювач, полістирол «Оазис», 3,3-дихлор-4,4-діамінодифенілметан, 4,4-діамінодифенілметан, корозійна стійкість, теплостійкість, руйнівні напруження при згинанні.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.029-037**

**Постановка проблеми.** Експлуатація морського та річкового транспорту передбачає фактор постійного впливу агресивного середовища та температурного поля на деталі устаткування. Це супроводжується позаплановим ремонтом, або заміною деталей, що призводить до суттєвих економічних витрат. Основний напрям вирішення даної проблеми складає розробка нових захисних покриттів із комплексом необхідних поліпшених властивостей: фізико-механічних, теплофізичних, корозійної стійкості тощо. Крім того, вагомою складовою є необхідність багаторазового відновлення робочої поверхні. Серед існуючих шляхів вирішення даної проблеми окреме місце займають захисні покриття на епоксидній основі через переваги, зумовлені необхідними технологічними та експлуатаційними властивостями. В цьому плані перспективною є їхня

фізична і хімічна модифікація водночас із наповненням дисперсними частками, що зумовлює формування матеріалу із поліпшеними у комплексі властивостями.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує широкий спектр полімерних композитних матеріалів (КМ) із підвищеною корозійною стійкістю та поліпшеними фізико-механічними та теплофізичними властивостями [1–4]. У даному напрямку ведеться активна розробка таких композитів, у тому числі й відомими українськими та закордонними вченими. Вагомим фактором для проведення досліджень у даному напрямку є експлуатація деталей засобів транспорту у агресивних середовищах – річкова та морська вода, бензин, нафта та різні кислоти. Водночас дані деталі регулярно зазнають впливу теплового поля. Підвищення надійності та міжремонтного ресурсу устаткування досі не втрачає своєї актуальності.

У зв'язку із науково-технічним прогресом більш пріоритетним є вдосконалення відомих покриттів з точки зору економії коштів та часу. Загальновідомо, що використання захисних покриттів на основі епоксидного олігомеру ЕД-20 та затверджених поліетиленполіаміном ПЕПА [5, 6] забезпечує підвищення міжремонтного ресурсу деталей засобів морського та річкового транспорту. Для поліпшення фізико-механічних і теплофізичних властивостей використовують модифікатори та наповнювачі за критичного вмісту. В даному напрямку доцільним є використання матеріалів із активними до міжфазової взаємодії групами та подібною структурою, що забезпечує підвищення когезійної міцності за рахунок щільно зшитої структури.

Встановлено [7], що одним із перспективних засобів формування полімерного КМ із поліпшеними фізико-механічними властивостями є введення до епоксидного зв'язувача модифікатора 3,3'-Дихлор-4,4'-діамінодифенілметану (ДХДАФМ) за критичного вмісту  $q = 0.25$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного діанового олігомеру ЕД-20.

Для формування КМ із поліпшеними теплофізичними властивостями доцільним є введення модифікатора 4,4'-діамінодифенілметану (ДАФМ) [8, 9].

Модифікація існуючих полімерів є більш швидким та економічним засобом отримання нових матеріалів із необхідними властивостями у порівнянні із розробкою нових матеріалів. Відомим способом отримання необхідного результату є сумішування полімера з іншими сполуками. Особливий пріоритет займає використання вторинних ресурсів, оскільки відпрацьовані полімери призводять до забруднення навколишнього середовища [10, 11]. Авторами [11] обґрунтовано пріоритетність використання вторинних ресурсів у виробництві у порівнянні із складуванням або спалюванням останніх. Одним із засобів вирішення існуючої проблеми є можливість застосування промислових полімерних відходів у вигляді подрібненої крошки, отриманої з некондиційних, забруднених та бракованих виробів із термопластів [12]. Полістирол «Оазис» виокремлюється відносно невисокою собівартістю та можливістю використання у якості вторинного ресурсу, що в свою чергу забезпечує зменшення забруднення навколишнього середовища.

**Мета роботи** – розроблення захисних полімеркомпозитних покриттів із підвищеною корозійною тривкістю та теплостійкістю для подальшого їх впровадження у промисловість.

**Матеріали та методика дослідження.** В якості епоксидного зв'язувача вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Поліетиленполіамін (ПЕПА) (ТУ 6-05-241-202-78) використовували в якості твердника. Використання ПЕПА надає можливість зшивання епоксидних композицій при кімнатних температурах. Стехіометричне співвідношення компонентів «епоксидний олігомер – твердник» складає 100 : 10.

З метою забезпечення поліпшення фізико-механічних властивостей використовували хімічну модифікацію композиції 3,3'-дихлор-4,4'-діамінодифенілметаном (ДХДАФМ). Даний модифікатор використовують в якості

твердника епоксидних смол, поліуретанів та склопластиків. Не є розчинним у воді, легко утворює солі із мінеральними кислотами, розчинний у органічних розчинниках.

Для формування КМ, призначених для експлуатації в умовах впливу температурного поля, вибрано модифікатор 4,4-діамінодифенілметан (ДАФМ), який є важливим продуктом у хімічній промисловості, використовується у якості твердника епоксидних смол та термопластів. Продукти, які виробляють за його допомогою, відрізняються поліпшеними механічними властивостями, електроізоляцією, термостійкістю та зносостійкістю.

У обраних модифікаторів подібна структура та наявні активні ароматичні групи  $\text{NH}_2$ , подібні до існуючих у твердника ПЕПА. Це забезпечує підвищення реакційної здатності компонентів.

Структура наповнювача полістиролу «Оазис» є подібною до існуючої у епоксидного діанового олігомеру ЕД-20. Обидва компоненти мають ідентичні бензольні кільця та «-СН» групи. Встановлено, що для формування КМ із оптимальними фізико-механічними та теплофізичними властивостями доцільно вводити наповнювач вмістом  $q = 0,06$  мас.ч. на 100 мас.ч. епоксидного олігомеру ЕД-20. Молекулярна формула наповнювача:  $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)]_n$ . ПО широко розповсюджений у флористичній сфері, крім того виокремлюється відносно.

Для дослідження антикорозійної стійкості розроблених покриттів для деталей транспорту, які експлуатують у агресивних середовищах, встановлено зміну маси зразків, модифікованих ДХДАФМ/ДАФМ і наповнених ПО. Зразки витримували у агресивних середовищах часом 720 год за температури  $T = 293 \pm 2$  К. Зразки з масою 1,0...1,2 г зважували на аналітичних вагах марки ВЛР-200 з точністю до  $\pm 0,001$  г перед дослідженням і після витримки в агресивних середовищах.

Розрахунок проникності агресивних середовищ при збільшенні маси зразків проводили згідно формули:

$$\chi = \frac{b-a}{a} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Навпаки, при зменшенні маси зразків проникність агресивної маси середовищ розраховували за формулою:

$$\chi = \frac{a-b}{a} \cdot 100\% , \quad (2)$$

де  $\chi$  – корозійна тривкість, %;  $a$  – маса зразків до випробувань, г;  $b$  – маса зразків після випробування, г.

Руйнівні напруження і модуль пружності КМ при згинанні визначали згідно ГОСТу 4648-71 і ГОСТу 9550-81 відповідно.

Вимірювання теплостійкості проведено згідно з ГОСТ 21341-75.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Перший етап досліджень складав випробування корозійної стійкості розроблених матеріалів після витримки у агресивних середовищах впродовж часу  $t = 720$  год за температури  $T = 293 \pm 2$  К. Для підтвердження достовірності проведених експериментів водночас випробували відомі розроблені КМ.

Проведено випробування п'яти складів антикорозійних КМ:

- епоксидна матриця (контрольний зразок), яку сформовано за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер ЕД-20 : твердник ПЕПА – 100 : 10;
- КМ 1, сформований за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер ЕД-20, модифікатор ДХДАФМ, наповнювач ПО і твердник ПЕПА - 100 : 0,25 : 0,06 : 10;
- КМ 2, сформований за наступного співвідношення компонентів – епоксидний олігомер ЕД-20, модифікатор ДАФМ, наповнювач ПО і твердник ПЕПА - 100 : 1,00 : 0,06 : 10;

– КМ 3, сформований за наступного співвідношення компонентів – модифікований зв’язувач : синтезована полімерна шихта СПШ : суміш дискретних волокон (ДВ 2: поліакрил (40 %), шерсть натуральна (40 %), бамбук (20 %)) ( $l = 1,5...2,0$  мм,  $d = 30...35$  мкм) – 100 : 0,05 : 0,05) [13];

– КМ 4, сформований за наступного співвідношення компонентів – модифікований зв’язувач : СПШ: ДВ 2 – 100 : 0,05 : 0,10 [13].

Згідно з проведеними дослідженнями (табл. 1) встановлено, що найменша проникність агресивних середовищ характерна для композитного матеріалу КМ1. Це зумовлено високою хімічною стабільністю у розробленого матеріалу. Сповільнення проникності агресивних середовищ у захисне покриття зумовлено збільшенням показників когезійної міцності, яка, в свою чергу, забезпечена взаємодією активних груп модифікатора і наповнювача у процесах зшивання епоксикомпозиту. В результаті відбувається формування щільної просторової сітки полімеру, що забезпечує поліпшення фізико-механічних властивостей сформованих матеріалів.

Таблиця 1 – Результати дослідження корозійної стійкості КМ

Агресивне середовище	Зміна маси зразків, %				
	Матриця	КМ 1	КМ 2	КМ 3	КМ 4
Нафта	2,9	1,6	2,0	2,2	2,6
Бензин	2,8	1,7	2,1	2,2	2,7
Морська вода	3,2	1,6	2,0	2,0	2,9
Ацетон	3,0	1,7	2,1	2,4	2,7
NaOH (50 %)	3,1	1,5	2,0	2,1	2,9
HCl (10%)	- 0,3	-0,1	-0,3	-0,2	-0,3
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (10%)	- 0,5	-0,2	-0,2	-0,3	-0,4

Примітка. Склад КМ 1 – епоксидний олігомер ЕД-20, модифікатор ДХДАФМ, наповнювач ПО і твердник ПЕПА - 100 : 0,25 : 0,06 : 10; Склад КМ 2 – епоксидний олігомер ЕД-20, модифікатор ДАФМ, наповнювач ПО і твердник ПЕПА - 100 : 1,00 : 0,06 : 10; Склад КМ 3 – модифікований зв’язувач : синтезована порошкова шихта (СПШ) : суміш дискретних волокон (ДВ 2: поліакрил (40 %), шерсть натуральна (40 %), бамбук (20 %)) – 100 : 0,05 : 0,05) [10]; Склад КМ 4 – модифікований зв’язувач : СПШ: ДВ 2 – 100 : 0,05 : 0,10 [13].

Розроблені матеріали КМ1 і КМ2 доцільно використовувати для відновлення і підвищення надійності деталей засобів морського та річкового транспорту, які експлуатують в умовах впливу агресивних середовищ. Матеріал КМ1 необхідно застосовувати для підвищення показників корозійної стійкості деталей, при їх експлуатації в умовах впливу агресивних середовищ. Матеріал КМ 2 розроблено для захисту деталей, які використовують в умовах дії температурних навантажень. У вигляді зв’язувача при формуванні розроблених матеріалів використано епоксидний олігомер ЕД-20, у який вводили модифікуючі добавки ДХДАФМ/ДАФМ та наповнювач ПО, які забезпечують підвищення ступеня зшивання полімеру і когезійної міцності гетерогенних композитів.

Для формування КМ 1 інгредієнти вводили у наведеному нижче співвідношенні (мас.ч.).

У результаті проведених досліджень розроблено два композити (КМ1 і КМ2) та покриття на їх основі із підвищеною корозійною тривкістю та теплостійкістю, які відповідають вимогам експлуатації сучасних транспортних засобів.

КМ1 – епоксидний композит з поліпшеними антикорозійними властивостями.

Основне призначення – ремонт і підвищення надійності деталей засобів морського та річкового транспорту, які контактують із агресивним середовищем. Доцільним є використання для відновлення та підвищення надійності конструкцій корпусу суден (надбудова, кришки та комінгси трюмів, тощо).

Склад КМ1 (мас.ч.):

– епоксидний діановий олігомер ЕД-20	100
– твердник ПЕПА	9...11
– модифікатор ДХДАФМ	0,25
– наповнювач ПО	0,06

КМ2 – епоксидний композит з поліпшеними теплофізичними властивостями.

Основне призначення – ремонт і підвищення надійності деталей засобів морського та річкового транспорту при їх роботі в умовах впливу теплового поля. Доцільним є використання для відновлення та підвищення надійності конструкцій корпусу суден.

Склад КМ2 (мас.ч.):

– епоксидний діановий олігомер ЕД-20	100
– твердник ПЕПА	9...11
– модифікатор ДАФМ	1,00
– наповнювач ПО	0,06

Запропоновано застосування розроблених композитів КМ1 і КМ2 у вигляді захисних покриттів на деталях морського і річкового транспорту, а саме на корпусі швартовної лебідки, надбудови, трубопроводів, сепараторі очистки льяльних вод, тощо. У вигляді першого шару запропоновано використання епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 із твердником ПЕПА, як композиту із оптимальними адгезійними властивостями. КМ2 обрано у вигляд формування другого шару через поліпшені теплофізичні властивості поряд із достатніми показниками модуля пружності при згинанні. В якості третього шару обрано КМ1 через оптимальні антикорозійні та фізико-механічні властивості такого композиту. Розроблені шари покриття доцільно використовувати як незалежно, так і у комплексі (у вигляді тришарового адгезиву) для ремонту і збільшення надійності деталей транспорту. Розроблену схему змішування та нанесення композиції наведено на рис. 1.

Для оптимізації процесу формування і нанесення покриттів на поверхню устаткування розроблено технологію, яка полягає у наступному (рис. 1): попереднє підігрівання епоксидного діанового олігомеру ЕД-20 до температури  $T = 353 \pm 2$  К із подальшою витримкою часом  $\tau = 20 \pm 0,1$  хв. Надалі проводиться дозування компонентів із подальшим їх гідродинамічним суміщенням ультразвуковою обробкою (УЗО). Після змішування епоксидної смоли, модифікатора і наповнювача часом  $\tau = 1,5 \pm 0,1$  хв композицію охолоджують до кімнатної температури часом  $\tau = 60 \pm 5$  хв. Наступний етап складає підігрівання композиції до  $T = 353 \pm 2$  К після введення твердника. Нанесення покриття здійснюється пневматичним розпиленням впродовж часу  $\tau = 60...80$  хв із подальшою витримкою часом  $\tau = 12,0 \pm 0,05$  год.

Згідно з ГОСТ 27.002-2015 термін «надійність» охоплює ряд таких функцій, як безвідмовність, ремонтпридатність, довговічність, збережуваність та готовність. Розроблено захисні покриття на композитній основі, які передбачають підвищений строк експлуатації в умовах агресивних середовищ та температурного впливу. Це забезпечує безвідмовність та довговічність деталей засобів морського та річкового транспорту. Перевагами розробки, порівняно із традиційними матеріалами, є забезпечення необхідного терміну експлуатації адгезивів – 4...6 років водночас із відносно низькою вартістю розроблених матеріалів на світовому ринку.

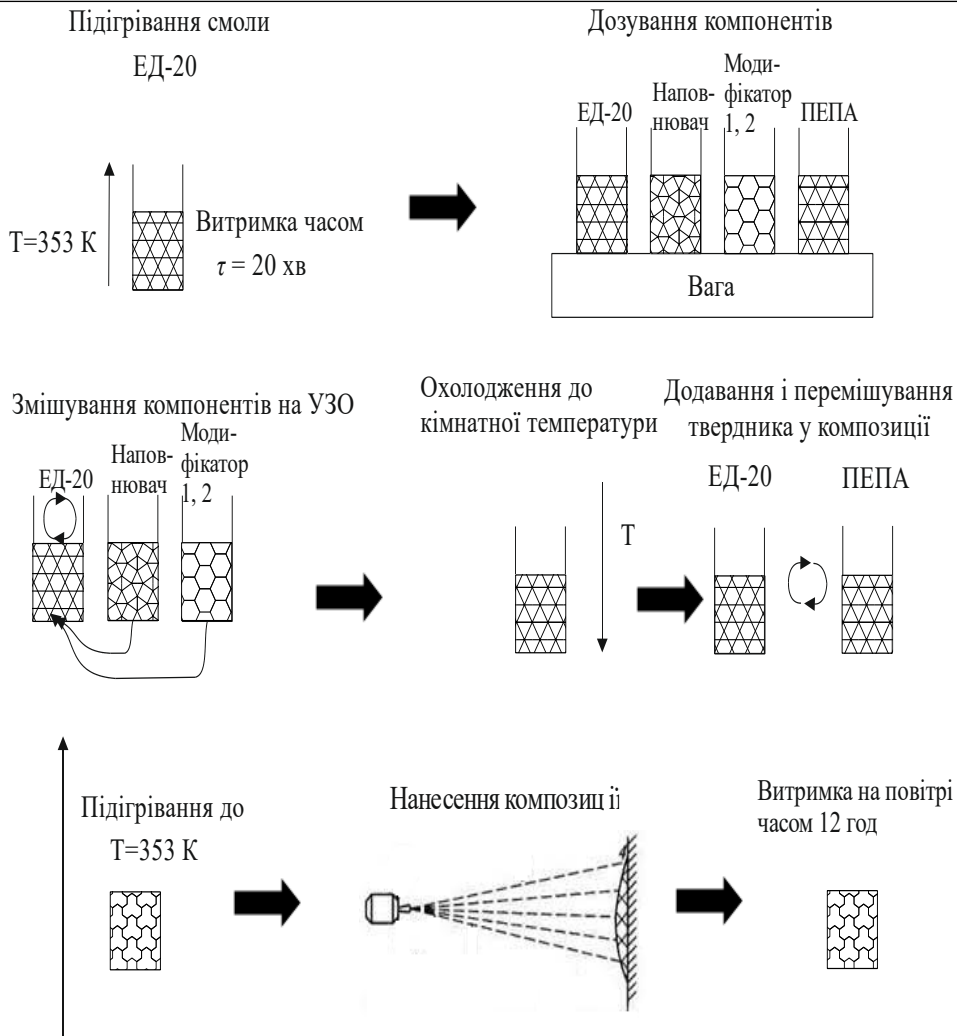


Рисунок 1 – Технологічна схема формування захисних покриттів

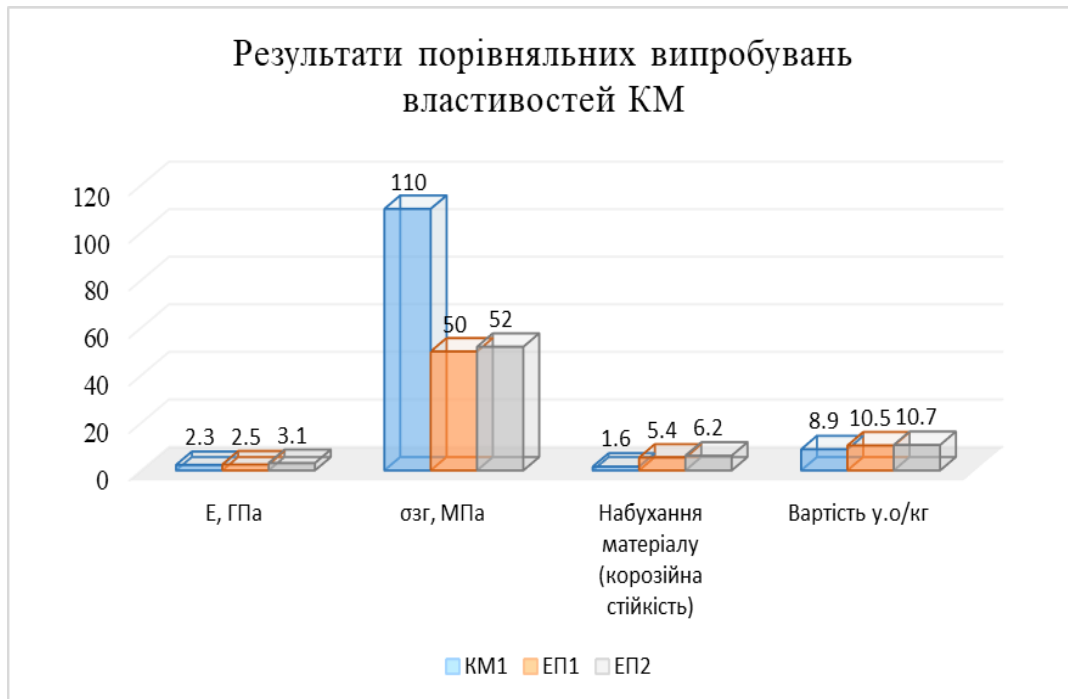


Рисунок 2 – Порівняння КМ1 із світовими аналогами:

КМ1 – розроблений композит; ЕП 1 – композит Епіпрайм-046 (Tikkurila, Фінляндія);

ЕП 2 – композит Wilkorox 500 (WILCKENS FARBEN, Німеччина)

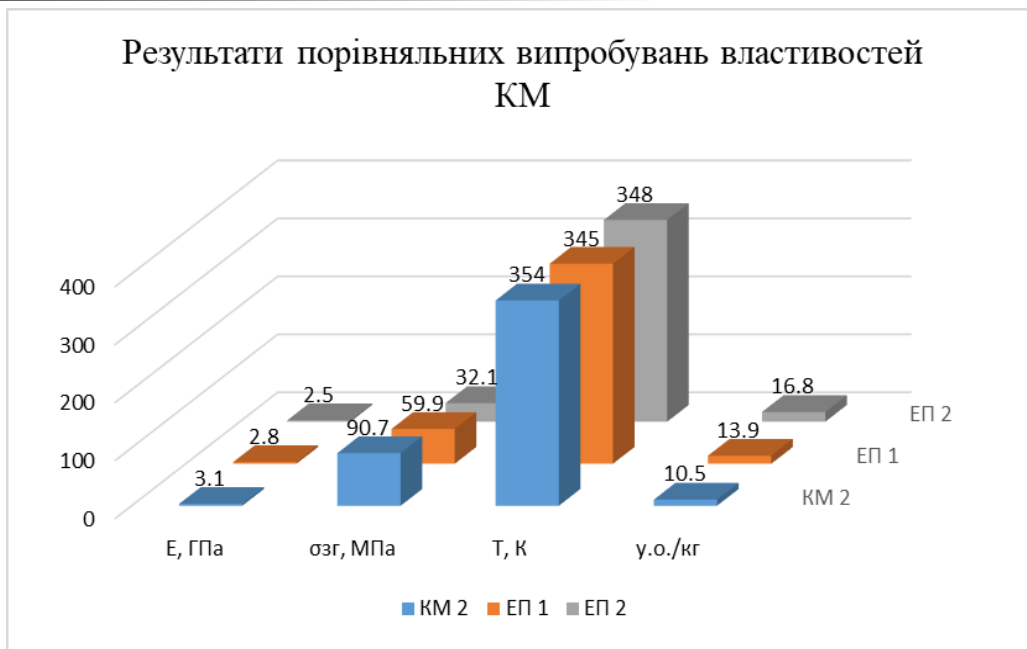


Рисунок 3 – Порівняння КМ2 із світовими аналогами:

КМ2 – розроблений композит; ЕП 1 – композит фірми Belzona 1161 (Великобританія);  
 ЕП 2 – композит Hempadur Multi-Strength 35842 (Hempel, Німеччина)

На рис. 2, 3 наведено порівняння показників фізико-механічних і теплофізичних властивостей, а також корозійної тривкості розроблених композитних матеріалів поряд із відомими світовими аналогами. Доведено наявність конкурентоспроможності розроблених КМ у промисловості.

**Висновки.** За результатами експериментальних досліджень розроблено композитні матеріали, захисні покриття на їх основі і технології їх формування і нанесення на деталі засобів річкового та морського транспорту. Впровадження розроблених у ПП «Інтелектуальні морські технології» (м. Миколаїв) забезпечило:

- збільшення показників руйнівних напружень при згинанні у 2,0...2,3 рази;
- підвищення корозійної стійкості у 1,6 разів.

Розроблені матеріали доцільно застосовувати для захисту устаткування, яке використовують у агресивних середовищах та умовах підвищених температурних навантажень. Конкурентоспроможність підтверджено порівнянням із аналогами відомих світових виробників. Надійність забезпечено за рахунок підвищення довговічності та міжремонтного ресурсу захисних покриттів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / М. В. Юрженко та ін. ; за ред. Б. Є. Патона. Київ : Наукова думка, 2018. 368 с.
2. Юрженко М. В., Кораб М. Г. Зварювання високотехнологічних пластмас : монографія. Суми : Університетська книга, 2016. 319 с.
3. Старокадомский Д. Л. Влияние дисперсности и концентрации аэросила в составе полиэпоксидных композиций на их набухание в кислых средах. *Укр. хим. журн.* 2010. №7–8. С. 89–96.
4. Корякина М. И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. Москва : Химия, 1988. 272 с.
5. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Чихіра І. В. Властивості модифікованих ультразвуком епоксипластів. Тернопіль : Крок, 2011. 201 с.
6. Энциклопедия полимеров: / редкол.: В. А. Кабанов и др. Москва : Советская Энциклопедия, 1974. Т. 2. 1032 с.

7. Processes of dynamic thermal destruction of composite epoxy materials as a function of 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane content / A.V. Buketov, V.G. Kulinich, S.A. Smetankin and other. *Compos. Mech. Comput. Appl.* 2020. V. 11. P. 77–98.

8. Вплив модифікаторів  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  та  $C_{13}H_{14}N_2$  на механічні властивості епоксидної матриці / А. В. Букетов, В. Г. Кулініч, С. А. Сметанкін та ін. *Наукові нотатки*. 2019. С. 37–45.

9. Buketov A. V, Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the physico-mechanical and thermophysical properties of epoxy composites with a two-component bidisperse filler. *Strength of Materials*. 2014. V.46. N. 5. P. 717–721.

10. Любешкина Е. Г., Гуль В. Е. Эффективные технологии вторичной переработки термопластов (обзор). *Пластические массы*. 1991. № 2. С. 3–11.

11. Решняк В. И., Витязева О. В. Исследование возможности утилизации пластиковых отходов, образующихся на объектах водного транспорта. *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. 2016. №3 (37). С. 45–52.

12. Носков Д. В., Артеменко С. Е., Овчинникова Г. П. Модификация вторичных мономеров. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2003. Т.46. Вып.1. С. 131–133.

13. Corrosion resistance of epoxy composite coatings for the transport industry in aggressive environments / A. V. Buketov, O.M. Bezbakh, N.M. Buketova and other. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2020. № 7 (1). P. 26–30.

## REFERENCES

1. Slovnyk-dovidnyk zi zvariuvannia ta skleiuwannia plastmas / M. V. Yurzhenko ta in.; za red. B. Ye. Patona. Kyiv : Naukova dumka, 2018. 368 s.

2. Iurzhenko M. V., Korab M. H. Zvariuvannia vysokotekhnolohichnykh plastmas : monohrafiia. Sumy : Universytetska knyha, 2016. 319 s.

3. Starokadomskiy D. L. Vliyanye dyspersnosti y kontsentratsyy aerosyla v sostave polyepoksydnykh kompozytsyi na ykh nabukhanye v kyslykh sredakh. *Ukr. khym. zhurn.* 2010. №7–8. S. 89–96.

4. Koriakyna M. Y. Ysprytanye lakokrasochnykh materiyalov y pokrytyi. M. : Khymyia, 1988. 272 s.

5. Buketov A. V., Stukhliak P. D., Chykhira I. V. Vlastyvoli modyfikovanykh ultrazvukom epoksyplastiv. Ternopil: Krok, 2011. 201 s.

6. Entsyklopedyia polymerov: / redkol.: V. A. Kabanov y dr. M. : Sovetskaia Entsyklopedyia, 1974. T. 2. 1032 s.

7. Processes of dynamic thermal destruction of composite epoxy materials as a function of 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane content / A.V. Buketov, V.G. Kulinich, S.A. Smetankin and other. *Compos. Mech. Comput. Appl.* 2020. V. 11. P. 77–98.

8. Vplyv modyfikatoriv  $C_{13}H_{12}Cl_2N_2$  ta  $C_{13}H_{14}N_2$  na mekhanichni vlastyvoli epoksydnoi matrytsi / A. V. Buketov, V. H. Kulinich, S. A. Smetankin ta in. *Naukovi notatky*. 2019. S. 37–45.

9. Buketov A. V, Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the physico-mechanical and thermophysical properties of epoxy composites with a two-component bidisperse filler. *Strength of Materials*. 2014. V.46. N. 5. P. 717–721.

10. Liubeshkina E. H., Hul V. E. Эффективные технологии вторичной переработки термопластов (обзор). *Пластические массы*. 1991. №2. S. 3–11.

11. Reshniak V. Y., Vytiazeva O. V. Yssledovanye vozmozhnosti utylyzatsyy plastykovykh otkhodov, obrazuiushchyhsia na ob'ektakh vodnoho transporta. *Vestnyk Hosudarstvennoho unyversyteta morskoho y rechnoho flota ymeny admyrala S. O. Makarova*. 2016. №3 (37). S. 45–52.

12. Noskov D. V., Artemenko S. E., Ovchynnykova H. P. Modyfykatsyia vtorychnykh monomerov. *Yzv. vuzov. Khymyia y khym. tekhnolohyia*. 2003. Т.46. Вып.1. S. 131–133.

13. Corrosion resistance of epoxy composite coatings for the transport industry in aggressive environments / A. V. Buketov, O.M. Bezbakh, N.M. Buketova and other. Journal of hydrocarbon power engineering. 2020. № 7 (1). P. 26–30.

**Букетов А. В., Кулинич В. Г., Кулинич В. В., Сметанкин С. А., Палагний В. И. ВНЕДРЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕМОНТА И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

*Разработаны два новых композитных материала и покрытия на их основе, внедренные в ЧП «Интеллектуальные морские технологии» г. Николаев. Это обеспечивает повышение долговечности деталей средств морского и речного транспорта за счет повышенной теплостойкости и коррозионной стойкости разработанных полимерных композитных материалов и защитных покрытий на их основе. Повышение коррозионной стойкости обеспечено с помощью использования защитного полимеркомпозитного покрытия на основе эпоксидного дианового олигомера ЭД-20, модифицированного 3,3-дихлор-4,4-диаминодифенилметаном, наполненного полистиролом «Оазис» и отверждённого полиэтиленполиамином ПЕПА. Введение в эпоксидное связующее таких ингредиентов позволяет повысить показатели разрушающих напряжений при изгибе эпоксикомпозитов от  $\sigma_{изг} = 48,0$  МПа (для эпоксидной матрицы) до  $\sigma_{изг} = 110,6$  МПа. Сформированное защитное покрытие выделяется повышенной когезионной прочностью, что обеспечивает замедление проницаемости агрессивных сред в составе разработанного эпоксикомпозита. Формирование защитного покрытия с повышенной теплостойкостью обеспечено путем введения в ЭД-20 модификатора 4,4-диаминодифенилметана, наполнителя полистирола «Оазис» и отвердителя ПЕПА. При таком содержании обеспечено формирование композитных материалов с улучшенными показателями теплостойкости от  $T = 341$  К (для эпоксидной матрицы) до  $T = 355$  К. Проведено сравнение физико-механических, теплофизических свойств и коррозионной стойкости разработанных материалов с известными мировыми аналогами. Это является непосредственным доказательством возможности их конкурентоспособности на мировом рынке. Следует отметить, что разработанные защитные покрытия позволили увеличить показатели разрушающих напряжений при изгибе в 2,0...2,3 раза, а коррозионной стойкости в 1,6 раза по сравнению с немодифицированной эпоксидной матрицей.*

**Ключевые слова:** эпоксидный олигомер, покрытие, модификатор, наполнитель, полистирол «Оазис», 3,3-дихлор-4,4-диаминодифенилметан, 4,4-диаминодифенилметан, коррозионная стойкость, теплостойкость, разрушающие напряжения при изгибе.

**Buketov A. V., Kulinich V. G., Kulinich V. V., Smetankin S. O., Palagnii V. I. IMPLEMENTATION OF PROTECTIVE HEAT-RESISTANT ANTI-CORROSIVE COATINGS FOR REPAIR AND INCREASING OF VEHICLE PARTS' RELIABILITY**

*Two new composite materials and coatings based on them have been developed and implemented in the private concern "Intellectual Marine Technologies" in Nikolaev city. The result arranges the increasing of sea and river transport's details' durability due to the increased heat resistance and corrosion resistance of the developed polymeric composite materials and protective coverings based on them. An increasing in corrosion resistance was achieved by usage of the epoxy-based protective coatings, based on epoxy diane oligomer ED-20, modified by 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane, filled with "Oasis" polystyrene and hardened with polyethylene polyamine PEPA. The introduction of such ingredients into the epoxy binder allows to increase the destructive stresses during bending of epoxy composites from  $\sigma_f = 48,0$  MPa (for epoxy matrix) to  $\sigma_f = 110,6$  MPa. Formed protective coating was distinguished by increased cohesive strength, which allow the slowing down the permeation of aggressive media in the volume of the developed epoxy composite. The creation of a protective coating with increased heat resistance was accomplished by introducing into the epoxy oligomer ED-20 the modifier 4,4-diaminodiphenylmethane, the filler of polystyrene "Oasis" and the hardener PEPA. With this content, the formation of composite materials with improved heat resistance from  $T = 341$  K (for epoxy matrix) to  $T = 355$  K. The obtained physical mechanical, thermal physical properties and corrosion resistance of developed materials were compared with well-known world analogues. It was actual approval of their competitive ability on the world's market. It should be noted that the developed protective coatings allowed to increase the indicators of destructive bending stresses to 2,0...2,3 times, and corrosion resistance to 1,6 times in comparence with unmodified epoxy matrix.*

**Keywords:** epoxy oligomer, coating, modifier, filler, "Oasis" polystyrene, 3,3-dichloro-4,4-diaminodiphenylmethane, 4,4-diaminodiphenylmethane, corrosion resistance, heat resistance, flexural breaking stress.

© Букетов А. В., Кулініч В. Г., Кулініч В. В., Сметанкин С. О., Палагний В. І.

Статтю прийнято  
до редакції 6.11.21

## МОДЕЛЬ РУХУ АВТОМОБІЛЯ ПО КРИВОЛІНІЙНІЙ ТРАСІ

**Рогатинський Р. М.**, *д-р тех. наук, професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна; e-mail: rogatynskiy@gmail.com; ORCID: 0000-0001-8536-4599;*

**Ляшук О. Л.**, *д-р тех. наук, професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна; e-mail: oleglashuk@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4881-8568;*

**Гевко І. Б.**, *д-р тех. наук, професор кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна; e-mail: gevkoivan1@ukr.net; ORCID: 0000-0001-5170-0857;*

**Хорошун Р. В.**, *аспірант кафедри автомобілів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна.*

*У статті розглядається питання забезпечення курсової стійкості автомобіля на етапі складання та вибору траєкторії руху автомобіля по площинній трасі із умови мінімізації негативних динамічних впливів. Досягнення вказаної мети забезпечується встановленням закономірностей вибору швидкісного режиму руху та раціональної траєкторії руху автомобіля і, відповідно, закону зміни кута повороту коліс залежно від параметрів траси, зокрема її кривини. Вихідними даними для розробленої моделі є параметри траси та її діляниць згідно технічних вимог на будівництво та дистанційного зондування, за якими визначаються біжучі параметри кривини траси та її смуг.*

*Траєкторія руху автомобіля задається як параметрична функція від шляху пройденого задніми колесами із врахуванням зміни кута нахилу коліс по трасі, за якою визначено траєкторії руху коліс і автомобіля та їх кривини. Узгодження кривин траси та траєкторії руху дозволило встановити безпечні кінематичні режими руху автомобіля по криволінійній трасі.*

*Рух по криволінійній траєкторії призводить до перерозподілу сил та моментів, що діятимуть на автомобіль. Вони врівноважуються реакціями на чотирьох колесах, і встановлення кінематичного та динамічного режиму руху дозволяє в подальшому уточнити динаміку автомобіля в цілому, використовуючи ітераційний процес. На подальших ітераціях уточнюється перерозподіл сил на реальні колеса і від велосипедної моделі переходять до моделі чотирьох колісного автомобіля з уточненням кінематичного та динамічного режимів руху автомобіля.*

*Побудована модель перебудови руху автомобіля із однієї смуги на іншу за гладкою функцією переходу на основі гіперболічних функцій. Встановлені особливості кінематичного та динамічного режиму руху за запропонованим переходом із вибором кривої переходу та встановленням безпечних параметрів ділянок переходу залежно від швидкісного режиму руху автомобіля.*

**Ключові слова:** *модель, автомобіль, кут нахилу коліс, курсова стійкість автомобілі, кривина траси.*

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.038-047**

**Постановка задачі.** Питання курсової стійкості руху автомобілів при русі по криволінійній трасі з урахуванням змінних у часі сил, є актуальним, оскільки змінна динаміка автомобіля при цьому призводить до зміни параметрів стійкості автомобіля. Збереження курсової стійкості автомобіля забезпечується відповідністю режимів та вибраної траєкторії руху топології траси, стану дорожнього покриття, погоднім умовам тощо. Поєднання цих факторів є важливим елементом розробки відповідних математичних моделей, потреба яких з появою автоматизованих систем правління автомобілем суттєво зросла.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У відомих працях проведено детальні дослідження курсової стійкості для прямолінійного та колового руху автомобіля, його входження в повороти, [1–6]. Зокрема детально розглянута траєкторія автомобіля при входженні та русі по круговій траєкторії [1], розкрито вплив масових та динамічних факторів на курсову стійкість легкового автомобіля [2], побудовані фазові портрети та траєкторії руху центра мас автомобіля [4]. Детальний аналіз стійкості автомобіля у неусталених режимах руху наведено в [5–7]. Проте низка питань, що стосуються раціонального, з точки зору забезпечення курсової стійкості автомобіля, вибору

функціонального зв'язку зміни кута повороту коліс та параметрів траєкторії руху автомобіля із режимами руху та параметрами розташування траси, розкрито недостатньо.

Слід відмітити, що в сучасних автомобілях для стабілізації положення автомобіля в процесі виконання маневрів використовується система ESP, що стежить за траєкторією автомобіля та її відповідністю куту повороту керма та в разі відхилення вносить керувальні впливи пригальмовуванням коліс. Зокрема у [8] наведено порівняльну характеристику траєкторії руху автомобіля з системою ESP і без неї по керованості та стійкості при заносі автомобіля на дорозі, де розкрито перевагу її використання. Проте система ESP, протидіючи недостатній чи надмірній обертальності, не забезпечує вибору оптимальної траєкторії, в цілому, при русі по криволінійним ділянкам, перебудові на іншу смугу. А тому вибір оптимальної траєкторії руху автомобіля залежно від кривини траси, характеру переміщення та перебудови по смугах із узгодженням швидкісного режиму його руху є актуальною задачею.

**Мета досліджень** полягає в забезпеченні курсової стійкості автомобіля на етапі складання та вибору траєкторії руху автомобіля із умови мінімізації негативних динамічних впливів. Досягнення вказаної мети забезпечується встановленням закономірностей вибору швидкісного режиму руху та раціональної траєкторії руху автомобіля і, відповідно, закону зміни кута повороту коліс, із параметрами траси автомобіля, зокрема її кривини.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Розвиток систем глобального позиціонування (GPS) та дистанційного зондування Землі дозволяє на новому рівні з високою точністю моделювати розміщення траси, відслідковувати її зміни, а також визначати на ній координати рухомих об'єктів, що дозволяє розробляти ефективні моделі руху автомобіля залежно від умов на трасі [9, 10] в т.ч. режимі реального часу.

Нехай у базовій (нерухомій) системі координат  $OXYZ$ , що нерухомо зв'язана з трасою задано рівняння траси в параметричному виді, як функція шляху по її середній лінії:

$$X = X(l); Y = Y(l); Z = Z(l), \quad (1)$$

де  $l$  – параметр довжини шляху по серединній лінії траси.

Для випадку площинного розміщення траси задача визначення траєкторії руху автомобіля перетвориться у двовимірну, де напрямком осей  $OX$  та  $OY$  визначатимемо за географічними координатами, причому вісь  $OX$  спрямовується в сторону руху, а початкові значення параметрів траси приймемо  $X(0) = 0; Y(0) = 0$ . Вектор напрямку траси на початку руху  $l_0 = l(t_0) = 0$  (у початковий момент часу  $t_0 = 0$ ), буде  $\vec{l}_0(0) = X'_l(0) \cdot \vec{i} + Y'_l(0) \cdot \vec{j}$  і з віссю  $OX$  утворюватиме кут  $\xi_0$ .

Кривина траси в площині  $OXY$  буде

$$K(l) = \frac{|X'_l Y''_l - Y'_l X''_l|}{(X'^2_l + Y'^2_l)^{(3/2)}}. \quad (2)$$

У загальному випадку, траєкторія траси визначається технічними вимогами на будівництво і її можна розбити на такі ділянки: прямолінійні з нульовою кривиною; колові постійної кривини; перехідні, по клотоїді із лінійною зміною кривини; перехідні із іншим законом зміни кривини.

Нехай траса поділена на  $n$  відрізків (ділянок) довжини яких  $\Delta l_{i-1,i} = l_i - l_{i-1}$  і на яких кривина змінюється згідно залежності:

$$K_i(l) = a_i + b_i(l - l_{i-1}), \quad (3)$$

де для прямолінійних ділянок  $a_i = 0$ ,  $b_i = 0$ ; для колових –  $b_i = 0$ , для ділянок побудованих по клотоїді –  $a_i \neq 0$ ,  $b_i \neq 0$ , причому на початку першої ділянки  $k_{01} = 0$ , а на границях переходу ділянок  $K_i(l_i) = K_{i+1}(l_i)$ .

Тоді закон зміни кривини за довжиною траси буде:

$$K(l) = \sum_{i=1}^n \{[(a_i + b_i(l-l_{i-1})) \cdot H[(l-l_{i-1})(l_i-l)]]\}, \quad (4)$$

де  $H[(l-l_{i-1})(l_i-l)]$  – функція Гевісайда, що рівна 1 тільки на  $i$ -ій ділянці та 0 – на інших,  $H[(l-l_{i-1})(l_i-l)] = \{1 + \text{sign}[(l-l_{i-1})(l_i-l)]\} / 2$ .

При проходженні автомобіля чергової  $m+1$ -ої ділянки ( $l_m \leq l < l_{m+1}$ ), біжучий кут повороту траси при зміні її кривини за залежністю (3) визначатиметься як:

$$\xi(l) = \xi_0 + a_{m+1}(l-l_m) + b_{m+1}(l-l_m)/2 + \sum_{i=1}^m [(a_i(l_i-l_{i-1}) + b_i(l_i-l_{i-1}))/2]. \quad (5)$$

При апроксимації залежності (4) гладкою кривою  $\xi = \bar{\xi}(l)$  координати біжучої точки  $E$  траси визначатимуться в параметричному вигляді як функція довжини траси:

$$X_E = X(l) = \int_0^l \cos[\bar{\xi}(l)] dl; \quad Y_E = Y(l) = \int_0^l \sin[\bar{\xi}(l)] dl. \quad (6)$$

Якщо смуга руху зміщена відносно серединної лінії траси по осі  $OY$  на віддаль  $u_\Delta$ , то за умови рівності граничних умов  $\bar{l}_{u0}(0) = \bar{l}_0(0)$  вона буде еквідистантою відносно серединної лінії траси і її рівняння в параметричному вигляді залежно від  $l$  буде:

$$X_u(l) = X(l) + \frac{u_\Delta \cdot Y_l'}{\sqrt{X_l'^2 + Y_l'^2}}; \quad Y_u(l) = Y(l) - \frac{u_\Delta \cdot X_l'}{\sqrt{X_l'^2 + Y_l'^2}}. \quad (7)$$

Довжина шляху  $l_u$  по смузі руху зв'язана із параметром траси  $l$  залежністю:

$$l_u = l - \Delta_\xi u_\Delta, \quad (8)$$

де  $\Delta_\xi$  – кут між векторами напрямку траси на її початку  $\bar{l}_0$  та в біжучій точці траси  $\bar{l}(l)$ ,  $\Delta_\xi = \xi(l) - \xi_0$ ;  $\xi_0 = \text{arctg}[Y_l'(0)/X_l'(0)]$ .

Вектор напрямку руху в біжучій точці  $E$  серединної траси  $\bar{l}_E(l)$  та в точці  $F_u$  смуги руху  $\bar{l}_{Fu}(l)$  з тим же параметром  $l$  будуть колінеарні, тобто  $\bar{l}_E(l) = \bar{l}_{Fu}(l)$ , де

$$\bar{l}_E(l) = X_l'(l) \cdot \bar{i} + Y_l'(l) \cdot \bar{j}; \quad \bar{l}_{Fu}(l) = X_l'(l) \cdot \bar{i} + Y_l'(l) \cdot \bar{j}.$$

Кривина смуги руху із кривиною траси зв'язана залежністю:

$$K_u(l_u) = \frac{K(l)}{1 - u_\Delta K(l)}. \quad (9)$$

Розміщення автомобіля на криволінійній трасі визначатиметься з однієї сторони параметрами пройденого автомобілем шляху, а з іншої – біжучим параметром траси  $l$ . Для побудови траєкторії руху автомобіля по трасі, розглянемо його велосипедну модель, в якій два передніх та два задніх коліс заміщені одним переднім та одним заднім уявними колесами, розміщеними на осі автомобіля, рис. 1.

При слідуванні за трасою кут повороту  $\theta$  уявного переднього колеса буде функцією часу  $\theta_t = \theta(t)$ . При цьому шлях, пройдений переднім колесом  $s_1 = l_u - A = l - \Delta_\xi u - A$ , де  $A$  – колісна база автомобіля. Відповідно, швидкість переднього колеса зв'язана із зміною в часі біжучого параметра розміщення автомобіля на трасі:

$$v_1 = dl_u / dt = dl / dt - u \cdot d\Delta_\xi / dt. \quad (10)$$

Співвідношення між елементарними переміщеннями уявного заднього  $ds_2$  та переднього  $ds_1$  коліс (задньої та передньої осей автомобіля), без врахування кутів відведення коліс буде:

$$ds_2 = ds_1 \cos\theta_t. \quad (11)$$

Із врахуванням кутів відведення, відповідно переднього  $\delta_1$  та заднього  $\delta_2$  коліс, залежність (10) прийме вигляд:

$$ds_2 \cos\delta_2 = ds_1 \cos(\theta_t - \delta_1). \quad (12)$$

Відповідно, співвідношення між їхніми швидкостями при русі із зміненим напрямом буде:

$$v_2 = v_1 \frac{\cos(\theta_t - \delta_1)}{\cos\delta_2}. \quad (13)$$

Якщо центр ваги автомобіля  $C(x_c; y_c)$  знаходиться від задньої осі на віддалі  $OC = b = \psi_c A$  від центра задньої осі  $O(x_o; y_o)$ , то елементарне переміщення центра ваги автомобіля буде

$$ds_c = ds_2 \cdot \sqrt{\cos^2 \delta_2 + \psi_c^2 \frac{\sin^2(\theta - \delta_1 + \delta_2)}{\cos^2(\theta - \delta_1)}}. \quad (14)$$

Розмістимо початок системи координат  $O_A x_A y_A$  автомобіля посередині задньої його осі, а вісь координат  $O_A x_A$  спрямуємо по осі автомобіля за напрямом руху. Відповідно при елементарному переміщенні т.  $O_A$  на  $ds_2$ , вісь  $O_A x_A$  разом із корпусом автомобіля повернеться на елементарний кут  $d\varphi$ , що рівний:

$$d\varphi = \frac{ds_1 \sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos\delta_2} = \frac{ds_2 \sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos(\theta - \delta_1)}. \quad (15)$$

Миттєва кутова швидкість повороту автомобіля відносно вертикальної осі буде:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v_1 \sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos\delta_2} = \frac{v_2 \sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos(\theta_t - \delta_1)}. \quad (16)$$

Радіус та кривина траєкторії руху переднього  $(R_1; k_1)$  та заднього  $(R_2; k_2)$  коліс:

$$R_1 = \frac{ds_1}{d\varphi} = \frac{A \cos\delta_2}{\sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}; \quad (17)$$

$$k_1 = \frac{\sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos\delta_2}; \quad (18)$$

$$R_2 = \frac{ds_2}{d\varphi} = \frac{A \cos(\theta_t - \delta_1)}{\sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}; \quad (19)$$

$$k_2 = \frac{\sin(\theta_t - \delta_1 + \delta_2)}{A \cos(\theta_t - \delta_1)}. \quad (20)$$

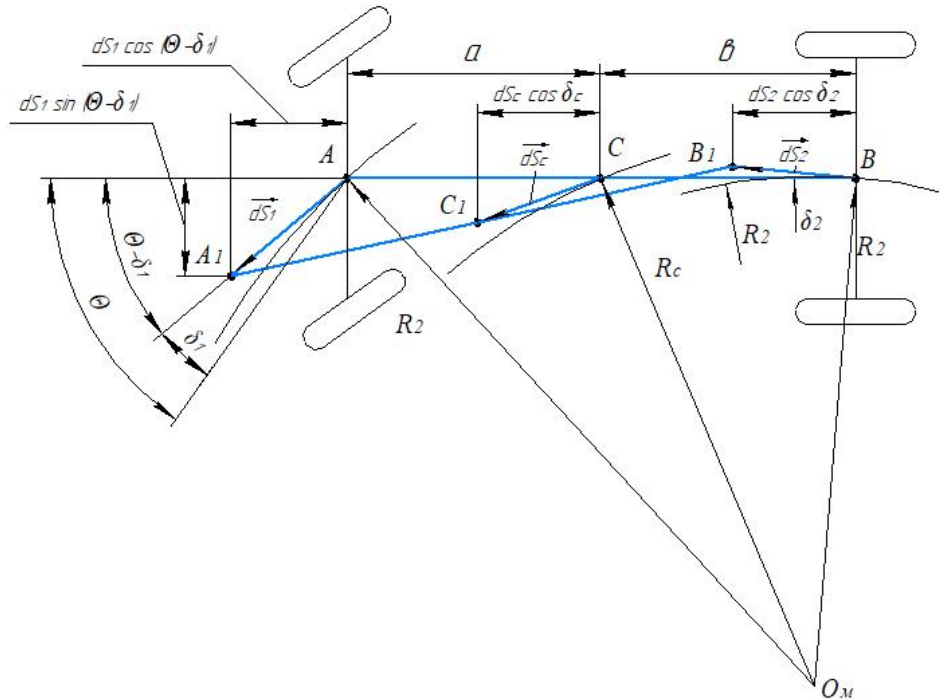


Рисунок 1 – Схема до визначення взаємозв'язку повороту коліс із траєкторією руху автомобіля

Із (18) та (20) слідує, що функціональний зв'язок кривин  $k_1$  та  $k_2$  визначається кутами повороту передніх коліс  $\theta$  та кутами відведення  $\delta_1$  та  $\delta_2$ .

$$k_2 = \frac{k_1 \cos(\delta_2)}{\cos(\theta_t - \delta_1)} \quad (21)$$

Радіус  $R_C$  та кривина  $k_C$  траєкторії руху центра ваги автомобіля:

$$R_C = \frac{ds_C}{d\varphi} = R_2 \sqrt{\cos^2 \delta_2 + \psi_C^2 \frac{\sin^2(\theta - \delta_1 + \delta_2)}{\cos^2(\theta - \delta_1)}}; \quad (22)$$

$$k_C = \frac{k_2 \cos^2(\theta - \delta_1)}{\sqrt{\cos^2 \delta_2 \cos^2(\theta - \delta_1) + \psi_C^2 \sin^2(\theta - \delta_1 + \delta_2)}}. \quad (23)$$

Залежності кривин траси (2) чи (3) та смуги (9) однозначно описують геометрію плоскої траси. Якщо переднє колесо автомобіля завжди слідуватиме посередині своєї смуги, то  $k_1 = K_{Au}(l_{Au})$ , де  $l_{Au} = l_u + A$ . Відповідно кут повороту уявного переднього колеса для слідування серединою смуги має змінюватись за законом:

$$\theta_t = \theta(l_A) = \arcsin(K_{Au} A \cos \delta_2) + \delta_1 - \delta_2, \quad (24)$$

де  $l_1 = l_{Au} = \int_0^{t_1} v_1(t) dt$  – біжуча довжина шляху переднього уявного колеса по середині смуги руху автомобіля.

Миттєвий центр обертання корпусу автомобіля  $C_{\omega}(x_{C\omega}; y_{C\omega})$  у власній системі координат буде:

$$x_{C\omega} = \frac{A \operatorname{tg} \delta_2}{\operatorname{tg}(\theta - \delta_1) + \operatorname{tg} \delta_2}; \quad y_{C\omega} = \frac{A}{\operatorname{tg}(\theta - \delta_1) + \operatorname{tg} \delta_2}. \quad (25)$$

При відомих координатах центра ваги автомобіля  $C_m(x_M; y_M)$ , радіус його повороту при русі по криволінійній трасі

$$R_M = \sqrt{(x_{C\omega} - x_M)^2 + (y_{C\omega} - y_M)^2}. \quad (26)$$

При русі автомобіля по криволінійній трасі на нього діятимуть інерційні сили  $F_{\omega} = mv_C^2 k_C$  від дії відцентрового прискорення  $a_r = v_C^2 k_C$ . Для забезпечення курсової стійкості автомобіля відцентрові прискорення не повинні перевершувати певної долі прискорення земного тяжіння. Тоді допустиме відцентрове прискорення можна встановити як  $a_r = k_g g$ , де  $k_g$  - коефіцієнт, що залежить від типу автомобіля та його стану, погодних умов, стану дорожнього полотна тощо. Відповідно швидкість автомобіля по трасі не повинна перевищувати максимальної на ділянках великої кривини. Прирівнявши  $k_C = K_u(l_u)$  визначимо закон зміни максимально допустимої швидкості по трасі:

$$v_{\text{дон}}(l_u) = \sqrt{\frac{k_g g}{K_u(l_u)}}. \quad (27)$$

При перебудові автомобіля із однієї смуги на іншу, його траєкторія руху відв'язується від траси смуги. При цьому важливо мінімізувати час переходу із однієї смуги на іншу при допустимому рівні динамічних навантажень без ривків. Останнє досягається, коли функція, що описує лінію руху автомобіля при переході на іншу смугу та її перша і друга похідні будуть гладкими функціями.

Таким вимогам у повні мірі відповідає лінія, що визначається гіперболічним тангенсом і для прямої траси має вигляд:

$$y(x) = \frac{u \cdot \tanh[\lambda(x - Q/2)] + u}{2} = \frac{u \cdot e^{\lambda(2x-Q)}}{1 + e^{\lambda(2x-Q)}}. \quad (28)$$

де  $u$  – віддаль між осьовими лініями сусідніх смуг (ширина смуги);  $\lambda$  – параметр згладжування кривої перебудови, визначає її розтягнутість;  $Q$  – довжина ділянки протягом якої проходить перебудова смуг руху автомобіля.

Виберемо мале поперечне переміщення  $\varepsilon_Q$ , яке суттєво не впливає на динаміку автомобіля і визначення його траєкторії та приймемо, що  $y(0) = \varepsilon_Q$ . Тоді згідно (28) довжина ділянки перебудови  $Q$  визначається із умови:

$$Q = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{u - \varepsilon_Q}{\varepsilon_Q} \right). \quad (29)$$

де  $\varepsilon_Q$  – параметр відхилення лінії гіперболічного тангенса від осі смуги, який є несуттєвим для зміни траєкторії руху автомобіля і який визначає початок його входження в передову смугу,  $\varepsilon_Q \leq 0,01$ .

Вигляд лінії перебудови для різних значень параметру  $\lambda$  для смуг шириною  $u = 3$  м на ділянці довжиною 40 м наведена на рис. 2.

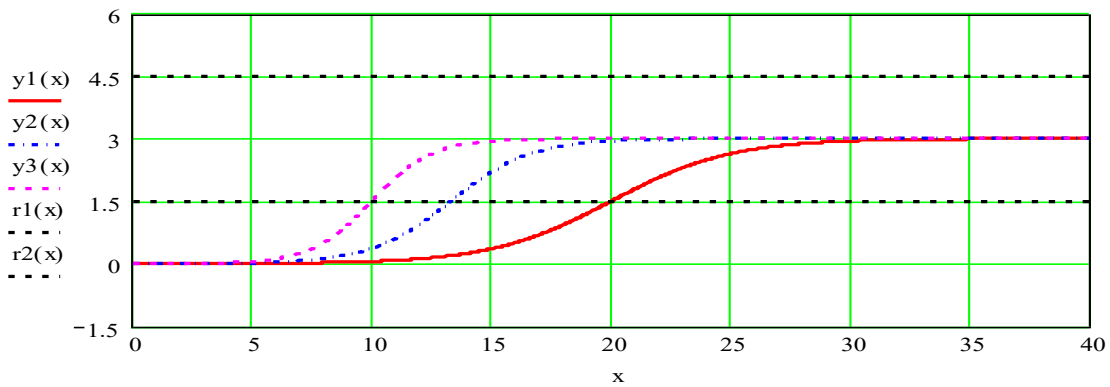


Рисунок 2 – Траскторії перебудови автомобіля із однієї смуги на іншу для різних значень параметру згладжування траскторії руху (по мірі зростання довжини перебудови):  $\lambda = 0,4 \text{ м}^{-1}$ ;  $\lambda = 0,3 \text{ м}^{-1}$ ;  $\lambda = 0,2 \text{ м}^{-1}$

Зміна напрямку руху при перебудові смуг визначається функцією:

$$y'(x) = dy/dx = 0,5\lambda u \operatorname{sech}^2[\lambda \cdot (x - Q/2)], \quad (30)$$

яка приймає максимальне значення в т.  $x = Q/2$ , де рівна  $y'(Q/2) = 0,5\lambda \cdot u$ .

Довжина лінії перебудови визначається із залежності  $s_Q = \int_0^Q \sqrt{1 + y_x'^2} dx$ .

Із врахуванням того, що  $y'(x) \ll 0$ , приймемо  $s_Q = \int_0^Q (1 + y_x'^2 / 2) dx = Q + 0,5 \int_0^Q y_x'^2 dx$ .

Друга похідна функції відповідає за динаміку руху автомобіля і визначається за залежністю:

$$y''(x) = d^2y/dx^2 = -\lambda^2 u \tanh[\lambda(x - Q/2)] \operatorname{sech}^2[\lambda(x - Q/2)]. \quad (31)$$

Функція (28) має два екстремуми, що рівні:

$$y_{ext}'' = \pm k_\lambda \lambda^2 u, \quad (32)$$

де  $k_\lambda$  – коефіцієнт рівний  $k_\lambda = 0,385$ .

Для пологих ліній перебудови автомобіля з однієї смуги на іншу його кривина визначається за залежністю:

$$K_x = y''(x) / \sqrt{1 + y'^2} = k_K y''(x). \quad (33)$$

де  $k_K$  – коефіцієнт приведення,  $k_K = 0,96$ .

Відповідно, на автомобіль діятимуть інерційні сили  $F_\omega = mv^2 K_x$  від дії відцентрового прискорення  $a_r = v^2 K_x$ . Для забезпечення курсової стійкості автомобіля обмеження по допустимому відцентрову прискоренню при перебудові автомобіля по смугах накладає обмеження на вибір траскторії перебудови залежно від швидкісного режиму руху. Із врахуванням (27), (32) та (33) – параметр згладжування кривої перебудови  $\lambda$  повинен бути не більше:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k_g g}{k_\Sigma v^2 u}}, \quad (34)$$

де  $k_\Sigma = k_K k_\lambda$  – комплексний коефіцієнт впливу траскторії руху при перебудові на динаміку автомобіля.

Якщо перебудова автомобіля із однієї смуги на іншу відбувається за траєкторією, що описується (28), то, із врахуванням (29) та (34), то довжина ділянки перебудови має становити

$$Q = v \sqrt{\frac{k_{\Sigma} u}{k_g g}} \ln \left( \frac{u - \varepsilon_Q}{\varepsilon_Q} \right). \quad (35)$$

У випадку, коли перебудова на іншу смугу проводиться на криволінійній ділянці траси, то розрахунок впливу швидкісного режиму руху на траєкторію перебудови проводиться аналогічно із врахуванням того, що кривини траси (2) чи (3) та кривини перебудови (32) додаються, що вносить зміни в розрахунок відцентрового прискорення.

**Висновки.** Розроблена модель за відомими параметрами розміщення траси та законом побудови траєкторії руху автомобіля дозволяє визначити всі кінематичні та динамічні параметри його руху та встановити взаємозв'язок зміни кута повороту передніх коліс залежно від кривини траси. Важливим є встановлення допустимих режимів руху автомобіля залежно від параметрів траси та швидкісного режиму руху автомобіля, та при зміні його траєкторії, зокрема при перебудові руху із однієї смуги на іншу. Встановлено, що уникнути суттєвих динамічних впливів, які могли б порушити курсову стійкість, дозволяє вибір плавних траєкторій проходження траси та її зміни. Цим вимогам у повній мірі відповідає рух автомобіля по кривих, що описуються залежністю (28). Така модель дозволяє визначити кінематичний та динамічний режим проходження трас та вибирати безпечні режими проходження траси та оцінювати параметри ділянок перебудови руху по смугах.

Рух по криволінійній траєкторії призводить до перерозподілу сил та моментів, що діятимуть на автомобіль. Вони врівноважуються реакціями на чотирьох колесах, і встановлення кінематичного та динамічного режиму руху дозволяє в подальшому уточнити динаміку автомобіля в цілому, використовуючи ітераційний процес. На першій ітерації визначаються усереднені кути відведення передніх  $\delta_1$  та задніх  $\delta_2$  коліс за дією інерційної сили від відцентрового прискорення. На подальших ітераціях уточнюється перерозподіл сил на реальні колеса і від велосипедної моделі переходять до моделі чотирьох колісного автомобіля з уточненням кінематичного та динамічного режимів руху автомобіля.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Макаров В. А., Волохов О. С. Моделювання руху автомобіля з урахуванням тягової сили й перерозподілу маси. *Автомобільний транспорт*. 2013. В. 32. С. 23–28.
2. Макаров В. А., Волохов А. С., Куплінов А. В. До питання вибору математичної моделі для дослідження курсової стійкості руху легкового автомобіля. *Наукові нотатки : міжвузівський збірник*. Луцьк, 2010. Вип. 28. С. 311–316.
3. Розвиток математичної моделі криволінійного руху двовісного автомобіля / Б. І. Кальченко [та ін.]. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Автомобіле- та тракторобудування*. Харків : НТУ "ХПІ", 2017. № 13 (1235). С. 45–50.
4. Вербицький В. Г., Макаров В. А., Костенко А. В. До питання визначення та аналізу показників курсової стійкості руху легкового автомобіля. *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту*. 2009. № 2 (9). С. 21–25.
5. Волохов О. С. Поліпшення стійкості автомобілів категорії М1 у неусталених режимах руху : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.22.02 – автомобілі та трактори ; Національний університет "Львівська політехніка". Львів, 2013. 22 с.
6. Andriy Andrukhiv, Bohdan Soki, Mariia Sokil, Yuriy Vovk, Michael Levcovych. The influence of the cinematic parameters of movement and sprung mass vibrations of wheeled

vehicles on the move along the curvedlinear sections of the way. *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceeding of the 1st International Scientific Conference*, Ternohil, Ukraine, May, 28–29, 2019. p. 259–264.

7. Sokil B., Lyashuk O., Sokil M., Popovich P., Vovk Y. and Perenchuk O. Dynamic Effect of Cushion Part of Wheeled Vehicles on Their Steerability. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2018. Volume 15, Issue 1. pp. 4880–4892.

8. Мандрика В. Р., Шликова В. Г. Керованість і стійкість руху автомобіля В-класу з системою ESP. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Транспортне машинобудування*. Харків : НТУ "ХПІ". 2013. № 31 (1004). С. 60–65.

9. Довжик М. Я., Калнагуз О. М., Сіренко Ю. В. Криволінійний рух чотирьохколісної машини з використанням супутникової навігаційної системи. *Наукові горизонти*. 2020. № 7 (92). С. 126–135.

10. Сіренко Ю. В. Траєкторія повороту машини з використанням супутникової навігаційної системи. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Молодь і технічний прогрес в АПВ". Інноваційні розробки в аграрній сфері*. Том 2. 17–18 травня 2021 р. Харків: ХНТУСГ, 2021. С. 123–126.

## REFERENCES

1. Makarov V. A. Modeljvannja rukhu avtomobilja z urakhuvannjam tjaghovoji syly j pererospodilu masy. V. A. Makarov, O. S. Volokhov. *Avtomobilnyj transport*. – 2013. – V. 32. – S. 23–28.

2. Makarov V. A. Do pytannja vyboru matematychnoji modeli dlja doslidzhennja kursovoji stijkosti rukhu leghkovogho avtomobilja / V. A. Makarov, A. S. Volokhov, A. V. Kuplinov // *Naukovi notatky : mizhvuzivsjkyj zbirnyk*. – Lucjk, 2010. – Vyp. 28. – S. 311–316.

3. Rozvytok matematychnoji modeli kryvolinijnogho rukhu dvovisnogho avtomobilja / B. I. Kaljchenko [ta in.] // *Visnyk Nac. tekhn. un-tu "KhPI" : zb. nauk. pr. Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannja*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. # 13 (1235). – S. 45–50.

4. Verbycjkyj V.Gh. Do pytannja vyznachennja ta analizu pokaznykiv kursovoji stijkosti rukhu leghkovogho avtomobilja / V. Gh. Verbycjkyj, V. A. Makarov, A. V. Kostenko // *Visti Avtomobiljno-dorozhnjogho instytutu*. – 2009. – № 2 (9). – S. 21–25.

5. Volokhov O. S. Polipshennja stijkosti avtomobiliv katehoriji M1 u neustalenykh rezhymakh rukhu : avtreferat dysertaciji na zdobuttja naukogho stupenja kandydata tekhnichnykh nauk : 05.22.02 – avtomobili ta traktory / Oleksandr Serghijovych Volokhov ; Nacionaljnyj universytet "Ljvivsjka politehnika". – Ljviv, 2013. – 22 s.

6. Andrij Andrukhiv, Bohdan Soki, Mariia Sokil, Yuriy Vovk, Michael Levcovych. The influence of the cinematic parameters of movement and sprung mass vibrations of wheeled vehicles on the move along the curvedlinear sections of the way // *ICCPT 2019: Current Problems of Transport: Proceeding of the 1st International Scientific Conference*, Ternohil, Ukraine, May, 28–29. – 2019. – p. 259–264.

7. B. Sokil, O. Lyashuk, M. Sokil, P. Popovich, Y. Vovk and O. Perenchuk. Dynamic Effect of Cushion Part of Wheeled Vehicles on Their Steerability (2018) *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2018. – Volume 15, Issue 1. – pp. 4880–4892.

8. Mandryka V. R. Kerovanistj i stijkistj rukhu avtomobilja B-klasu z systemoju ESP / V. R. Mandryka, V. Gh. Shlykova // *Visnyk Nac. tekhn. un-tu "KhPI" : zb. nauk. pr. Temat. vyp. : Transportne mashynobuduvannja*. – Kharkiv : NTU "KhPI". – 2013. – № 31 (1004). – S. 60–65.

9. Dovzhyk M. Ja. Kryvolinijnyj rukh chotyrykhkolisnoji mashyny z vykorystannjam suputnykovoji navighacijnoji systemy / M. Ja. Dovzhyk, O. M. Kalnaghuz, Ju. V. Sirenko // *Naukovi ghorizonty*. – 2020. – № 7 (92). – S. 126–135.

10. Sirenko Ju. V. Trajektorija povorotu mashyny z vykorystannjam suputnykovoji navighacijnoji systemy. *Materialy Mizhnarodnoji nauково-praktychnoji konferenciji "Molodj i tekhnichnyj prohres v APV". Innovacijni rozrobky v aghrarnij sferi*. Том 2. 17–18 travnja 2021 r. Kharkiv: KhNTUSGh, 2021. S. 123–126.

**Рогатинский Р. М., Ляшук О. Л., Гевко И. Б., Хорошун Р. В. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПО КРИВОЛИНИЧЕСКОЙ ТРАССЕ**

*В статье рассматривается вопрос обеспечения курсовой устойчивости автомобиля на этапе сборки и выбора траектории движения автомобиля по плоскостной трассе с условиями минимизации негативных динамических воздействий. Достижение указанной цели обеспечивается установлением закономерностей выбора скоростного режима движения и рациональной траектории движения автомобиля и, соответственно, закона изменения угла поворота колес в зависимости от параметров трассы, в частности, ее кривины. Исходными данными для разработанной модели являются параметры трассы и ее участков согласно техническим требованиям на строительство и дистанционного зондирования, по которым определяются бегущие параметры кривины трассы и ее полос.*

*Траектория движения автомобиля задается как параметрическая функция пути пройденного задними колесами с учетом изменения угла наклона колес по трассе, по которой определены траектории движения колес и автомобиля и их кривины. Согласование кривин трассы и траектории движения позволило установить безопасные кинематические режимы движения автомобиля по криволинейной трассе.*

*Движение по криволинейной траектории приводит к перераспределению сил и моментов, действующих на автомобиль. Они уравниваются реакциями на четырех колесах, и установка кинематического и динамического режима движения позволяет в дальнейшем уточнить динамику автомобиля в целом, используя итерационный процесс. На последующих итерациях уточняется перераспределение сил на реальные колеса и от велосипедной модели переходят к модели четырех колесных автомобилей с уточнением кинематического и динамического режимов движения автомобиля.*

*Построена модель перестройки движения автомобиля с одной полосы в другую по гладкой функции перехода на основе гиперболических функций. Установлены особенности кинематического и динамического режима движения по предложенному переходу с выбором кривой перехода и установлению безопасных параметров участков перехода в зависимости от скоростного режима движения автомобиля.*

**Ключевые слова:** модель, автомобиль, угол наклона колес, курсовая устойчивость автомобиля, кривина трассы.

**Rogatynskiy R., Lyashuk O., Hevko I., Horoshyn R. CAR MOTION MODEL ON A CURVED LINE**

*The article discusses the issue of ensuring the exchange rate stability of the car at the stage of assembly and the choice of the trajectory of the car along a flat track with the conditions for minimizing negative dynamic effects. Achievement of this goal is ensured by establishing the patterns of choosing the speed mode of movement and the rational trajectory of the vehicle and, accordingly, the law of changing the angle of rotation of the wheels depending on the parameters of the track, in particular, its curvature. The initial data for the developed model are the parameters of the route and its sections in accordance with the technical requirements for construction and remote sensing, according to which the running parameters of the curvature of the route and its stripes are determined.*

*The vehicle trajectory is specified as a parametric function of the path traveled by the rear wheels, taking into account the change in the angle of inclination of the wheels along the track, along which the trajectories of the wheels and the vehicle and their curvature are determined. Coordination of the curvatures of the track and the trajectory of movement made it possible to establish safe kinematic modes of movement of the car along a curved track.*

*Moving along a curved path leads to a redistribution of forces and moments acting on the car. They are balanced by the reactions on the four wheels, and the setting of the kinematic and dynamic driving modes allows further refinement of the dynamics of the vehicle as a whole using an iterative process. At subsequent iterations, the redistribution of forces to real wheels is clarified and from the bicycle model they pass to the model of four-wheeled vehicles with the specification of the kinematic and dynamic modes of vehicle movement.*

*A model is built for restructuring the movement of a car from one lane to another according to a smooth transition function based on hyperbolic functions. The features of the kinematic and dynamic mode of movement on the proposed transition with the choice of the transition curve and the establishment of safe parameters of the transition sections depending on the speed mode of the vehicle are established.*

**Keywords:** car, model, wheel angle, cars stability, track curvature.

© Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Хорошун Р. В.

Статтю прийнято  
до редакції 8.11.21

## НОВІТНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ СУДНОВИХ ВАНТАЖНИХ ТА ПАЛУБНИХ МЕХАНІЗМІВ

**Сапронов О. О.**, *д.т.н., доцент, заступник завідувача кафедри, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: oo.sapronov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1115-6556;*

**Шаранов В. Д.**, *асистент кафедри навігації і управління судном Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія», м. Ізмаїл, Україна, e-mail: vladsharanov609@gmail.com, ORCID: 0009-0005-4349-2185;*

**Воробйов П. О.**, *аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: Vorobyov020291@gmail.com, ORCID:0000-0003-4120-2023;*

**Сапронова А. В.**, *аспірант кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: sapronova.ane4ka@gmail.com, ORCID:0000-0002-4327-4293;*

**Настасенко В. О.**, *д.т.н., доцент, професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: nastasenko2004@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0330-1138;*

**Палагній В. І.**, *старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vpalagniy@ukr.net.*

Для формування композитних матеріалів та захисних покриттів на їх основі використано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 і твердник поліетиленполіамін ПЕПА. Вибір різнодисперсних наповнювачів обумовлений наявністю активних груп на їх поверхні, комплексом поліпшених характеристик компонентів, що викликає науковий і практичний інтерес при використанні добавок для формування захисних покриттів. Оптимальний вміст різнодисперсних добавок у епоксидному зв'язувачі ЕД-20 визначено за допомогою математичного планування експерименту з використанням прикладного пакету STATGRAPHICS® Centurion XVI. Це дозволило спрогнозувати та отримати епоксидне покриття з комплексом поліпшених властивостей. Встановлено, що поліпшеними фізико-механічними властивостями характеризуються композитний матеріал наступного складу: суміш дискретних органічних волокон –  $q = 0,025$  мас.ч., антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА. Такий епоксикомпозитний матеріал характеризується наступними властивостями: руйнівне напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 92,6$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 5,6$  ГПа. На основі математичного планування експерименту визначено варіанти покриттів, які випробовували на корозійну тривкість. Проведений аналіз зміни питомого опору і питомої ємності покриттів впродовж 30 діб під впливом різних агресивних середовищ (сірчана кислота і річкова вода) за температури  $T = 293 \pm 2$  К. Встановлено, що композитний матеріал, який містить у своєму складі: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), СДОВ (0,025 мас.ч), HDBS (20 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА (10 мас.ч.) за рахунок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття характеризується найвищим значенням питомого опору і найменшим значенням питомої ємності у всіх агресивних середовищах. Це свідчить про покращенні антикорозійні властивості покриття. Візуальний аналіз дефектів, який проводили в природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб дозволив підтвердити попередні експериментальні дослідження і визначити покриття з поліпшеними антикорозійними властивостями.

**Ключові слова:** епоксидна матриця, руйнівні напруження при згинанні, модуль пружності при згинанні, математичне планування експерименту, оптимізація наповнювача, корозія.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.048-058**

**Постановка проблеми.** Проблема антикорозійного захисту деталей транспорту полягає у тому, що значна кількість деталей, вузлів і агрегатів виготовляють із сталей та сплавів на основі заліза. На сьогодні сплави підвищеної корозійної стійкості також

знають руйнування у природних (повітря, природні водойми і ґрунти) та технологічних середовищах (нафта, кислоти, луги). Це у свою чергу призводить до значних фінансових витрат пов'язаних із захистом від корозії деталей транспорту, вартістю ремонтних робіт, а також збитками за рахунок тимчасового припинення нормального функціонування пошкодженого корозією обладнання чи транспорту [1–3].

**Аналіз останніх публікацій та досліджень.** Для надійного захисту деталей, вузлів і агрегатів транспорту, технологічного устаткування, металевих конструкцій актуальним є розробка нових композитних матеріалів та покриттів на їх основі з високим хімічним опором. Одним із способів підвищення стійкості захисних покриттів до агресивних природних і технологічних середовищ є введення у епоксидну матрицю різнодисперсних наповнювачів. Рациональне поєднання добавок різної фізико-хімічної природи і дисперсності забезпечить підвищення ступеня зшивання композитного матеріалу і відповідно дозволить поліпшити експлуатаційні характеристики розроблених матеріалів. Враховуючи вищенаведене актуальним є дослідження впливу двох наповнювачів у комплексі на фізико-механічні і антикорозійні властивості композитних матеріалів і покриттів на їх основі [4–8].

**Мета роботи** – дослідити вплив волокнистого і дисперсного наповнювачів на властивості епоксидних захисних покриттів.

**Матеріали та методика дослідження.** Для формування захисних покриттів використовували епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 (ГОСТ 10587-84). Це продукт на основі дигліциділового ефіру дифенілолпропана. Його характеристики: молекулярна маса  $M_{ED-20} = 340$  г/моль; функціональність епоксидних груп  $f_{EP} = 2,0$ ; вміст епоксидних груп – 20,0...22,5%; вміст гідроксильних груп – 1,25%; в'язкість  $\eta = 13...20$  Па·с; густина  $\rho = 1,160$  г/см<sup>3</sup> [1–4].

Для поліпшення властивостей захисних покриттів використовували два наповнювачі у комплексі (суміш дискретних органічних волокон і антиагломеруючу добавку Hydropho biervnsmittel), оптимальний вміст яких визначали методом математичного планування експерименту з використанням прикладного пакету STATGRAPHICS® Centurion XVI.

Суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) характеризується наступним складом: шовк – 50 %, акрил – 45 %, поліамід – 5 %, з параметрами  $l = 9...15$  мм,  $d = 18...25$  мкм. Акрилові волокна забезпечують стійкість до атмосферного впливу (високий ступінь водовідштовхування), підвищують теплостійкість. Тоді, як волокна шовку забезпечують еластичність. Поліамід використовують як антикорозійний матеріал.

Зважаючи на схильність до агломерування дискретних волокон використовували антиагломеруючу добавку німецького виробництва Hydropho biervnsmittel (HDBS) (розміром часток 8...12 мкм), що додатково забезпечує стійкість до атмосферного впливу і морозостійкість.

Формування модифікованої епоксидної матриці виконували у послідовності, описаній у працях [5–7].

У роботі досліджували: руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні, корозійну стійкість, за методиками описаними у працях [1–7]. Корозійну стійкість досліджували двома методами: у лабораторних умовах аналізували зміну питомого опору і питомої ємності зразків у часі під впливом агресивних середовищ (річкова вода (р. Дніпро), сірчана кислота (ГОСТ 4204-77), використовуючи прилад RCL-метр типу E7-22 і у природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб проводили якісний аналіз (наявність дефектів) і кількісний (зміна маси в інтервалі часу).

**Результати дослідження та їх обговорення.** Попередньо методом математичного планування експерименту визначали раціональний вміст основного наповнювача – суміші дискретних органічних волокон (СДОВ) та додаткового – антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel (HDBS). При оптимізації вмісту різних за природою наповнювачів

для формування захисного покриття використовували ортогональне центральне композиційне планування. Вміст основного та додаткового наповнювачів вибирали на основі комплексних досліджень фізико-механічних властивостей КМ [7, 9, 10]. Виходячи з результатів дослідження когезійної міцності КМ, у табл. 1 наведено основні рівні зміни вмісту компонентів СДОВ і HDBS.

Таблиця 1 – Рівні змінних в умовному і натуральному масштабах

Компоненти	Фактор	Середній рівень, $q$ , мас.ч.	Крок варіювання, $\Delta q$ , мас.ч.	Значення рівнів змінних (мас.ч.), що відповідають умовним одиницям		
				-1	0	+1
Суміш дискретних органічних волокон (СДОВ)	$x_1$	0,025	0,015	0,010	0,025	0,040
Антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel (HDBS)	$x_2$	20	10	10	20	30

Математичну модель залежності властивостей  $y = f(x_1, x_2)$  шукали у вигляді рівняння регресії [11–13]. Таким чином отримали наступні рівняння регресії:

– при аналізі руйнівних напружень при згинанні ( $y_1$ ):

$$y_1 = 83,24 - 6,12x_1 - 2,83x_2 - 4,02x_1^2 - 4,37x_2^2 - 5,40x_1x_2; \quad (1)$$

– при аналізі модуля пружності при згинанні ( $y_2$ ):

$$y_2 = 5,39 - 0,25x_1 + 0,05x_2 - 0,28x_1^2 - 0,08x_2^2 - 0,28x_1x_2. \quad (2)$$

Для статистичної обробки отриманих результатів експерименту проведено перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохрена ( $G$ ), за методикою описаною у працях [11, 12]. Перевірка результатів експерименту за критерієм Кохрена для фіксованої ймовірності  $\alpha = 0,05$  підтвердила відтворюваність дослідів. При цьому розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,158$ , а табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$  (для  $y_1$ ). Відповідно розрахункове значення критерію Кохрена:  $G_{розр} = 0,273$ , а табличне значення критерію Кохрена:  $G_{табл} = 0,478$  (для  $y_2$ ). Таким чином встановлено, що виконується умова  $G_{розр} = 0,158 \leq G_{табл} = 0,478$  (для руйнівних напружень при згинанні) і  $G_{розр} = 0,273 \leq G_{табл} = 0,478$  (для модуля пружності при згинанні) відповідно.

Надалі визначали значущість коефіцієнтів рівняння регресії, аналізуючи результати за планом експерименту у відповідності до методики, описаній у працях [11–14]. Перевіривши значущість коефіцієнтів рівнянь регресії (1) та (2) встановлено, що рівняння залишається без змін для досліджуваних властивостей.

За критерієм Фішера [11–14] встановлено, що представлені рівняння адекватно описують склад композиції.

За методикою, описаною у працях [11–16], проводили перетворення, для отримання рівнянь регресії з натуральними значеннями змінних параметрів. При цьому отримано наступні рівняння регресії:

- руйнівні напруження при згинанні

$$\sigma_{зг} = 52,4815 + 1204,81q_1 + 2,3633q_2 - 17851,9q_1^2 - 0,0437q_2^2 - 36,0q_1q_2. \quad (3)$$

- модуль пружності при згинанні

$$E = 3,66852 + 82,963q_1 + 0,0841667q_2 - 1259,26q_1^2 - 0,00083q_2^2 - 1,833q_1q_2. \quad (4)$$

За допомогою рівнянь представлених у натуральних значеннях побудували графіки залежності вихідної величини (руйнівні напруження і модуль пружності при згинанні) від вмісту добавок. Геометричну інтерпретацію поверхні відгуку наведено на рис. 1, а, б.

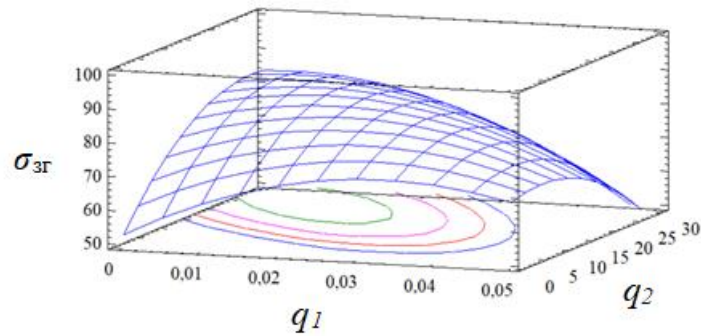


Рисунок 1, а – Розрахункова поверхня відгуку (руйнівні напруження при згинанні)  $\sigma_{зг} = f(q_1, q_2)$

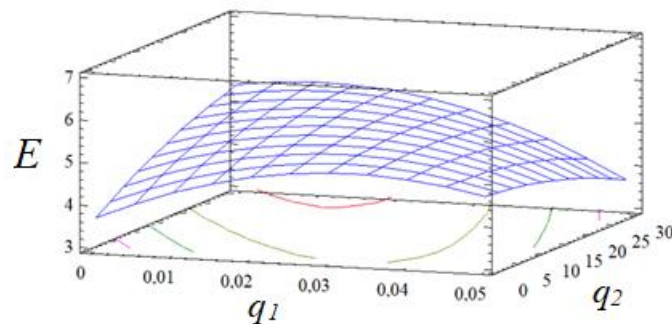


Рисунок 1, б – Розрахункова поверхня відгуку (модуль пружності при згинанні)  $E = f(q_1, q_2)$

Аналізуючи розраховану поверхню відгуку визначено, що максимальними показниками руйнівних напружень при згинанні характеризуються композити при вмісті наповнювачів: суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) – 0,025 мас.ч., антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel (HDBS) – 20 мас.ч. ( $\sigma_{зг} = 92,6$  МПа). Максимальними показниками модуля пружності при згинанні – епоксидний композит за наступного вмісту добавок: суміш дискретних органічних волокон (СДОВ) – 0,010 мас.ч., антиагломеруюча добавка hydropho biervnsmittel (HDBS) – 30 мас.ч. ( $E = 5,8$  ГПа).

Враховуючи, що розроблені матеріали можливо використовувати у багатьох галузях промисловості, передбачено їх експлуатація у різних агресивних середовищах, зокрема річкова вода, сірчана кислота (ГОСТ 4204-77).

Значущим при розробці антикорозійних покриттів є здатність зберігати адгезійну та когезійну міцність під дією зовнішніх факторів (повітря із температурою від 233 К до 323 К ( $\pm 20$  К), відносна вологість до 95% при температурі 293 К ( $\pm 20$  К), ультрафіолетове випромінювання, знижений атмосферний тиск, роса, туман). Окрім того, важливою характеристикою корозійнотривкого покриття є проникнення агресивного середовища крізь полімер до основи. Тому, у роботі проводили дослідження корозійної тривкості у лабораторних і безпосередньо у природних умовах. У лабораторних умовах аналізували зміну питомого опору і питомої ємності розроблених матеріалів у часі під впливом агресивних середовищ (сірчана кислота, річкова вода).

У природних умовах під впливом річкової води і змінних температур у діапазоні  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб проводили якісний аналіз – досліджували покриття за зовнішніми ознаками (крайова корозія, відшарування покриття, розтріскування), а також кількісний – аналізували зміну ваги покриттів товщиною  $h = 130...150$  мкм і площею  $S = 27,5$  см<sup>2</sup>, які наносили на зразки зі сталі 45 методом пневматичного розпилення.

Методом математичного планування експерименту визначено склад добавок для формування епоксикомпозитних захисних покриттів. У лабораторних умовах випробовували чотири варіанти антикорозійного епоксикомпозитного покриття (АЕП):

- АЕП 1 – матриця (контрольний зразок);
- АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.);
- АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.);
- АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.).

Експериментально встановлено найменші показники питомого опору і найбільші показники питомої ємності у досліджуваних середовищах для епоксидної матриці (рис. 2). При цьому слід зауважити, що зниження опору (з  $\rho = 0,17 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  до  $\rho = 0,15 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  – у середовищі річкової води; з  $\rho = 0,20 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  до  $\rho = 0,17 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  – у середовищі сірчаної кислоти) спостерігали у період 5-ї доби випробовування. Отримані результати дослідження вказують про початкову стадію утворення корозії.

При цьому для розроблених композитних матеріалів АЕП 2, АЕП 3, АЕП 4 (рис. 2, а) спостерігали несуттєве зменшення питомого опору і у середовищі річкової води впродовж 30 діб дослідження. Водночас слід зазначити, що зміну питомої ємності спостерігали у період 5-ї доби дослідження (рис. 2, б). При цьому найменше значення питомої ємності –  $c = 11,0 \dots 12,0 \text{ пФ}/\text{м}^2$  характерне для композитного матеріалу (АЕП 3) наповненого СДОВ за вмісту 0,025 мас.ч. і HDBS – 20 мас.ч., що корелює із результатами питомого опору та свідчить про блокування процесу дифузії середовища річкової води (іонів води і кисню).

При дослідженні корозійної стійкості розроблених матеріалів у середовищі сірчаної кислоти спостерігали дещо зменшення показників питомого опору і збільшення питомої ємності (порівняно із середовищем води), що пов'язано із перебігом хімічних реакцій, які призводять до утворення гідроксильних іонів та підвищення рівня рН. Це у свою чергу супроводжується процесом хімічного руйнування зв'язків полімеру.

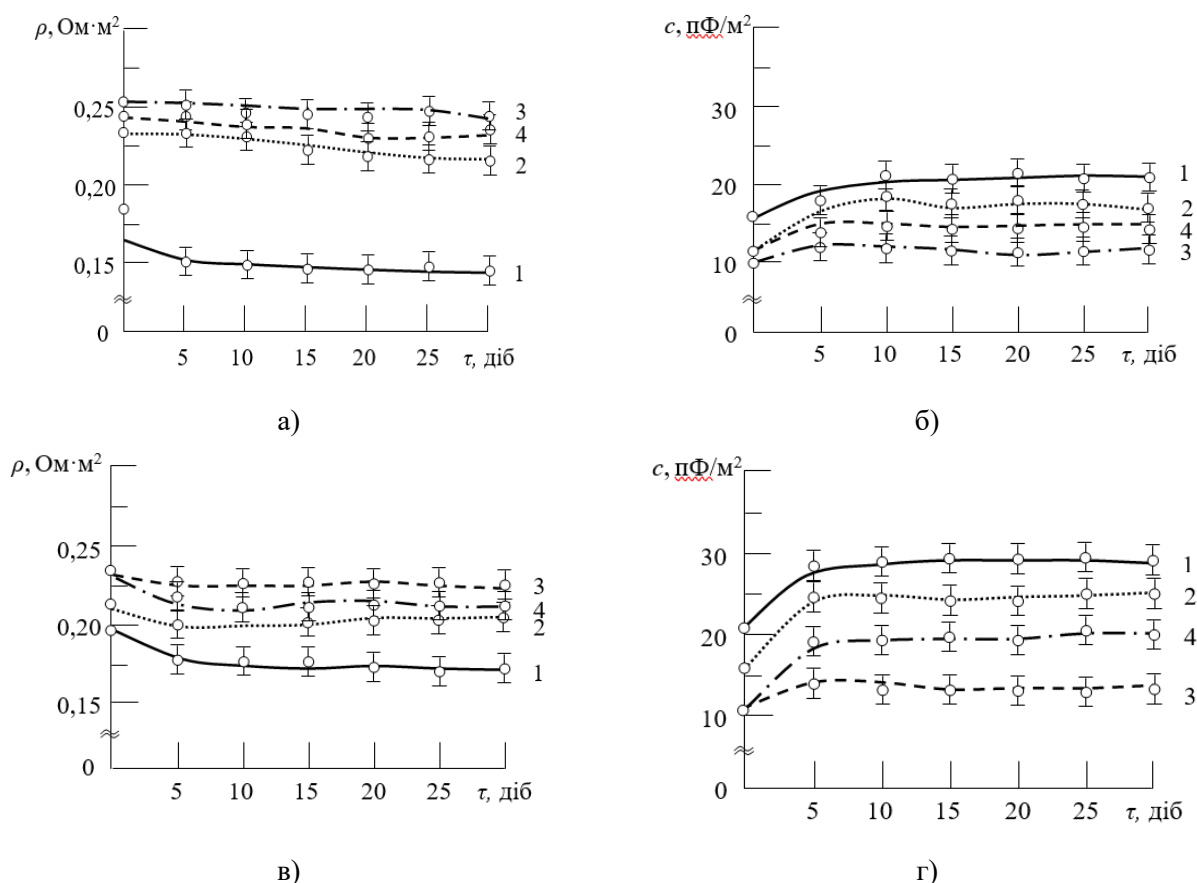


Рисунок 2 – Часова зміна питомого опору (а, в) та питомої ємності (б, г) антикорозійних епоксидних захисних покриттів при частоті 1 кГц у агресивних середовищах: а, б) річкова вода (р. Дніпро); в, г) сірчана кислота; 1 – матриця (контрольний зразок); 2 – АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.); 3 – АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.); 4 – АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.)

Встановлено, покриття АЕП 3, що містить у своєму складі наповненого СДОВ за вмісту 0,025 мас.ч. і HDBS – 20 мас.ч. характеризується найбільшим значенням питомого опору –  $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$  і найменшим значенням питомої ємності –  $c = 14,0 \text{ пФ/м}^2$  (рис. 2, в, г). Тобто, можна припустити, що оптимальне співвідношення добавок, які містять значну кількість активних -О-Н- і NH<sub>2</sub> груп забезпечують підвищення ступеня зшивання та забезпечує сповільнення електрохімічних реакцій, внаслідок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття.

Враховуючи наведені вище результати дослідження можна стверджувати, що найбільш агресивним середовищем є сірчана кислота, де розроблене покриття АЕП 3 характеризується підвищеними антикорозійними характеристиками.

При дослідженні корозійної стійкості розроблених матеріалів у природних умовах (рис. 3) використовували річкову (Дніпрову) воду. Дослідження проводили на гідробіологічній станції м. Херсон.

Якісний аналіз (рис. 3) у природних умовах (за діапазону температур  $\Delta T = (258...298) \pm 2 \text{ К}$ ) дозволяє констатувати про високу корозійну стабільність розроблених матеріалів на основі епоксидного зв'язувача з різними за природою добавками (АЕП 1; АЕП 2; АЕП 3) у агресивному середовищі при знакозмінній температурі, позаяк крайової корозії, відшарування покриття, розтріскування не спостерігали. Спостерігали корозійне руйнування поверхні металу не захищеного захисним покриттям. Однак кількісний аналіз (табл. 2) дозволив встановити зміну маси покриттів після експериментальних досліджень. Вважали, що в середовищі річкової води відбувається сорбція води епоксидною матрицею, таким чином використання ненаповнених полімерів не є актуальним. У такому випадку можливе проникнення вологи на границю поділу фаз покриття – металева основа. Тоді, як раціональне ведення у полімерну матрицю волокнисто-дисперсної добавки сприяє підвищенню хімічної стійкості до агресивного середовища, що пояснюється зменшенням долі полімеру в об'ємі композиту.



I II III I II III  
а) б)

Рисунок 3 – Дослідження корозійної стійкості:  
а) покриття до випробовування (I - АЕП 1; II - АЕП 2; III - АЕП 3);  
б) покриття після 250 днів випробовування (I - АЕП 1; II - АЕП 2; III - АЕП 3)

Таблиця 2 – Корозійна стійкість ПКП після витримки протягом 250 діб у річковій воді при знакозмінній температурі  $(258...298) \pm 2$  К

Оптимальний вміст наповнювача, $q$ , мас.ч.	Зміна маси наповнених епоксикомпозитних покриттів в умовах впливу річкової води, %		
	До випробовування, $m_1$ , %	Після випробовування, $m_2$ , %	$\Delta m$ , %
АЕП 1 – матриця (контрольний зразок);	3,2	3,39	+0,19
АЕП 2 (СДОВ (0,010 мас.ч.) + HDBS (30 мас.ч.)).	3,2	3,25	+0,05
АЕП 3 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (20 мас.ч.));	3,4	3,42	+0,02
АЕП 4 (СДОВ (0,025 мас.ч.) + HDBS (10 мас.ч.));	3,1	3,15	+0,05

**Висновки.** На основі проведених комплексних досліджень встановлено наступне.

1. Методом математичного планування експерименту оптимізовано вміст різних за фізико-хімічною природою добавок у епоксидному зв'язувачі для отримання покриттів функціонального призначення. Встановлено оптимальний вміст основного (суміші дискретних органічних волокон) і додаткового (антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel) наповнювачів для формування композитів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Доведено, що введення суміші дискретних органічних волокон за вмісту  $q = 0,025$  мас.ч. та антиагломеруючої добавки hydropho biervnsmittel за вмісту  $q = 20$  мас.ч. на 100 мас.ч. олігомеру ЕД- 20 і 10 мас.ч. твердника ПЕПА забезпечує формування матеріалу з такими властивостями: руйнівні напруження при згинанні –  $\sigma_{z2} = 92,6$  МПа, модуль пружності при згинанні –  $E = 5,6$  ГПа.

2. Встановлено, що впродовж  $\tau = 30$  діб витримки у різних агресивних середовищах (сірчана кислота і річкова вода) найбільшим значенням питомого опору характеризується розроблений композитний матеріал АЕП-3, що містить у своєму складі: епоксидний олігомер ЕД-20 (100 мас.ч.), СДОВ (0,025 мас.ч.), HDBS (20 мас.ч.), твердник поліетиленполіамін ПЕПА (10 мас.ч.) за рахунок утворення дифузійного бар'єру в об'ємі захисного покриття.

3. На основі кількісного і якісного аналізу корозійної стійкості розроблених покриттів у природних умовах ( $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К впродовж  $\tau = 250$  діб) встановлено, незначну зміну маси ( $\Delta m = 0,02\%$ ) та відсутність дефектів при випробовуванні матеріалу, що містить у своєму складі наступні компоненти: суміш дискретних органічних волокон –  $q = 0,025$  мас.ч. та антиагломеруючу добавку hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  мас.ч. Отримані результати випробовування у природних умовах корелюють із результатами дослідження корозійної стійкості у лабораторних умовах, що свідчить про високі показники антикорозійних властивостей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kashytskyi, V., Savchuk, P., Malets, V., Herasymiuk, Y., and Shcheglov, S., Examining the Effect of Physical Fields on the Adhesive Strength of Protective Epoxy Composite Coatings, *Eastern-European J. Enterp. Technol.* 2017. vol. 3, no. 12. pp. 16–22.
2. Dolgov, M. A., Zubrets'ka, N. A., Buketov, A. V., and Stukhlyak, P. D., Use of the Method of Mathematical Experiment Planning for Evaluating Adhesive Strength of Protective Coatings Modified by Energy Fields, *Strength Mater.* 2012. vol. 44, no. 1. pp. 81–86.
3. Сметанкін, С. О., Нігалатій, В. Д., Букетов, А. В., Шарко, О. В., Скирденко, О. І., Баглюк, Г. А. Розробка модифікованих полімерних композитів для ремонту деталей

енергетичних установок транспортних систем. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2016. Випуск 1. С. 252–261.

4. Buketov A. V., Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. *Strength of Materials*. 2014. Vol. 46, No 5. pp.717–723. doi: 10.1007/s11223-014-9605-z.

5. Сапронов О. О. Підвищення антикорозійних характеристик деталей суднових енергетичних установок за рахунок використання епоксикомпозитних покриттів. *Наукові нотатки*. 2014. Випуск 47. С. 176–181.

6. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen, J. E. Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology*. 2002. 74(8). pp. 63–72. doi:10.1007/bf02697969.

7. Buketov A. V., Saprionova A. V., Saprionov O. O., Buketova N. M., Sotsenko V. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Maruschak P. O., Panin S. V., Smetankin S. O., Kulinich A. G., Kulinich V. G. Influence of the structure of epoxy composite filled with discrete fibers on impact fracture of vehicle parts. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2020. Vol. 11. № 2. pp. 113–127. doi: 10.1615/CompMech ComputApplIntJ.2020031192).

8. Яцишин О. І., Червінський Т. І., Братичак М. М. Вивчення структурування епоксидної смоли ЕД-20 у присутності реакційноздатних олігомерів. Вісник Львівської політехніки. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2012. № 726. С. 467–471.

9. Buketov A. V., Saprionova A. V., Brailo M. V., Sotsenko V. V., Yurenin K. Yu., Antonio B. Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5(2). P. 43–49.

10. Сапронова А. В. Вплив вмісту органічних волокон у епоксидному зв'язувачі на показники адгезійної та когезійної міцності покриттів транспортної техніки. *Науковий вісник ХДМА*. 2019. №1(20). С. 141–151.

11. Браїло М. В., Букетов А. В., Якущенко С. В., Dulebova L. Застосування методу планування експерименту при формуванні полімерного композиту з поліпшеними експлуатаційними характеристиками для його використання у засобах транспорту. *Наукові нотатки*. Випуск 60. 2017. С. 58–68.

12. Букетов А. В., Акимов А. В., Нигалатий В. Д., Браїло Н. В., Аль-Джавахери Али Андан Мансур. Применение методов математической статистики для оптимизации состава защитных покрытий. *Вестник Карагандинского государственного университета*. 2017. №1 (85). С. 17–27.

13. Браїло М. В., Якущенко С. В., Кобельник О. С., Букетова Н. М., Вороненко С. В. Створення нанопоповнених епокси-поліефірних композитних матеріалів для захисту елементів суднових технічних засобів. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1 (22). С. 136–144.

14. Браїло М. В., Якущенко С. В., Фесенко І. П. Оптимізація вмісту ініціатора у поліефірній матриці за її фізико-механічними властивостями. *Наукові нотатки*. 2017. Випуск 57. С. 32–36.

15. Захаров Н. М., Алушкина Т. В. Оптимизация состава защитных покрытий на основе эпоксидных смол. *Электронный научный журнал «Нефтегазовое обращение»*. 2009.

16. Букетов, А. В., Гусєв, В. М., Кулініч, А. Г., Якущенко, С. В., Житник, Д. В.: Оптимізація вмісту інгредієнтів при формуванні захисних покриттів для підвищення ресурсу роботи транспортних засобів. *Науковий вісник ХДМА*. 2020. 2 (23). С. 58–67.

## REFERENCES

1. Kashytskyi, V., Savchuk, P., Malets, V., Herasymiuk, Y., and Shcheglov, S., Examining the Effect of Physical Fields on the Adhesive Strength of Protective Epoxy Composite Coatings, *Eastern-European J. Enterp. Technol.* 2017. vol. 3, no. 12. pp. 16–22.
2. Dolgov, M. A., Zubrets'ka, N. A., Buketov, A. V., and Stukhlyak, P. D., Use of the Method of Mathematical Experiment Planning for Evaluating Adhesive Strength of Protective Coatings Modified by Energy Fields, *Strength Mater.* 2012. vol. 44, no. 1. pp. 81–86.
3. Smetankin, S. O., Nigalatij, V. D., Buketov, A. V., Sharko, O. V., Sky'rdenko, O. I., Baglyuk, G. A. Rozrobka modyfikovany'x polimerny'x kompozy'tiv dlya remontu detalej energety'chny'x ustanovok transportny'x sy'stem. *Naukovy'j visny'k Xersons'koyi derzhavnoyi mors'koyi akademiyi.* 2016. Vy'pusk 1. S. 252–261.
4. Buketov A. V., Saprionov O. O., Brailo M. V. Investigation of the Physico-Mechanical and Thermophysical Properties of Epoxy Composites with a Two-Component Bidisperse Filler. *Strength of Materials.* 2014. Vol. 46, No 5. pp.717–723. doi: 10.1007/s11223-014-9605-z.
5. Saprionov O. O. Pidvy'shennya anty'korozijnny'x xaraktery'sty'k detalej sudnovy'x energety'chny'x ustanovok za raxunok vy'kory'stannya epoksy'kompozy'tny'x pokry'ttiv. *Naukovi notatky'.* 2014. Vy'pusk 47. S. 176–181.
6. Elmore J. D., Kincaid D. S., Komar P. C., Nielsen, J. E. Waterborne epoxy protective coatings for metal. *Journal of Coatings Technology.* 2002. 74(8). pp. 63–72. doi:10.1007/bf02697969.
7. Buketov A. V., Saprionova A. V., Saprionov O. O., Buketova N. M., Sotsenko V. V., Brailo M. V., Yakushchenko S. V., Maruschak P. O., Panin S. V., Smetankin S. O., Kulinich A. G., Kulinich V. G. Influence of the structure of epoxy composite filled with discrete fibers on impact fracture of vehicle parts. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal.* 2020. Vol. 11. № 2. pp. 113–127. doi: 10.1615/CompMech ComputApplIntJ.2020031192).
8. Yacy'shy'n O. I., Chervins'ky'j T. I., Braty'chak M. M. Vy'vchennya strukturuvannya epoksy'dnoyi smoly' ED-20 u pry'sutnosti reakcijnozdatny'x oligomeriv. *Visny'k L'vivs'koyi politexniky'.* *Ximiya, texnologiya rechovy'n ta yix zastosuvannya.* 2012. # 726. S. 467–471.
9. Buketov A. V., Saprionova A. V., Brailo M. V., Sotsenko V. V., Yurenin K. Yu., Antonio B. Polymer composites for improving the resource of pipeline transport. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering.* 2018. Vol. 5(2). P. 43–49.
10. Saprionova A. V. Vply'v vmistu organichny'x volokon u epoksy'dnomu zv'yazuvachi na pokazny'ky' adgezijnoyi ta komezijnoyi micznosti pokry'ttiv transportnoyi texniky'. *Naukovy'j visny'k XDMA.* 2019. #1(20). S. 141–151.
11. Brayilo M. V., Brayilo M. V., Buketov A. V., Yakushhenko S. V., Dulebova L. Zastosuvannya metodu planuvannya ekspery'mentu pry' formuvanni polimernogo kompozy'tu z polipsheny'my' ekspluatacijny'my' xaraktery'sty'kami' dlya jogo vy'kory'stannya u zasobax transportu. *Naukovi notatky'.* Vy'pusk 60. 2017. S. 58–68.
12. Buketov A. V., Aky'mov A. V., Ny'galaty'j V. D., Bray'lo N. V., Al'-Dzhavaxery' Aly' Andan Mansur. Pry'meneny'e metodov matematy'cheskoj staty'sty'ky' dlya opy'tny'x zacy'y' sostava zashhy'tny'x pokry'ty'j. *Vestny'k Karagandy'nskogo gosudarstvennogo uny'versy'teta.* 2017. #1 (85). S. 17–27.
13. Brayilo M. V., Yakushhenko S. V., Kobel'ny'k O. S., Buketova N. M., Voronenko S. V. Stvorenniya nanonapovneny'x epoksy'-poliefirny'x kompozy'tny'x materialiv dlya zaxy'stu elementiv sudnovy'x texnichny'x zasobiv. *Naukovy'j visny'k Xersons'koyi derzhavnoyi mors'koyi akademiyi.* 2020. # 1 (22). S. 136–144.
14. Brayilo M. V., Yakushhenko S. V., Fesenko I. P. Opy'tny'x mizaciya vmistu iniciatora u poliefirnij matry'ci za yiyi fizy'ko-mexanichny'my' vlasty'vostyamy'. *Naukovi notatky'.* 2017. Vy'pusk 57. S. 32–36.

15. Zaharov N. M., Alushky`na T. V. Opty`my`zacy`ya sostava zashhy`tnyx pokryty`j na osnove epoksy`dnyx smol. Elektronnyj nauchnyj zhurnal «Neftegazovoe obrashheny`ya». 2009.

16. Buketov, A. V., Gusyev, V. M., Kulinich, A. G., Yakushhenko, S. V., Zhy`tny`k, D. V.: Opty`mizaciya vmistu ingrediєntiv pry` formuvanni zaxy`sny`x pokry`ttiv dlya pidvy`shhennya resursu roboty` transportny`x zasobiv. Naukovy`j visny`k XDMA. 2020. 2 (23). S. 58–67.

**Сапронов А. А., Шаранов В. Д., Воробьев П. А., Сапронова А. В., Настасенко В. О., Палагний В. И. НОВЕЙШИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АНТИКОРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ СУДНОВЫХ ГРУЗОВЫХ И ПАЛУБНЫХ МЕХАНИЗМОВ**

*Для формирования композитных материалов и защитных покрытий на их основе использованы эпоксидный диановый олигомер марки ЭД-20 и отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА. Выбор разнодисперсных наполнителей обусловлен наличием активных групп на их поверхности, комплексом улучшенных характеристик компонентов, что вызывает научный и практический интерес при использовании добавок для формирования защитных покрытий. Оптимальное содержание разнодисперсных добавок в эпоксидном связующем ЭД-20 определено с помощью математического планирования с использованием прикладного пакета STATGRAPHICS® Centurion XVI. Это позволило спрогнозировать и получить эпоксидное покрытие с комплексом улучшенных свойств. Установлено, что улучшенными физико-механическими свойствами характеризуются композитный материал следующего состава: смесь дискретных органических волокон –  $q = 0,025$  масс.ч., антиагломерирующая добавка hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  масс.ч. на 100 масс.ч. олигомера ЭД-20 и 10 масс.ч. отвердителя ПЭПА. Такой эпоксикомпозитный материал характеризуются следующими свойствами: разрушающее напряжения при изгибе –  $\sigma_{32} = 92,6$  МПа, модуль упругости при изгибе –  $E = 5,6$  ГПа. На основе математического планирования эксперимента определены варианты покрытий, которые испытывали на коррозионную стойкость. Проведен анализ изменения удельного сопротивления и удельной емкости покрытий в течение 30 суток под влиянием различных агрессивных сред (серная кислота и речная вода) при температуре  $T = 293 \pm 2$  К. Установлено, что композитный материал, содержащий в своем составе: эпоксидный олигомер (100 масс.ч.), СДОВ (0,025 масс.ч), HDBS (20 масс.ч.), отвердитель полиэтиленполиамин ПЭПА (10 масс.ч.) за счет образования диффузионного барьера в объеме защитного покрытия характеризуется высоким значением удельного сопротивления и минимальным значением удельной емкости во всех агрессивных средах. Это свидетельствует об улучшении антикоррозионных свойств покрытия. Визуальный анализ дефектов, проводимых в естественных условиях под влиянием речной воды и переменных температур в диапазоне  $\Delta T = (258...298) \pm 2$  К в течение  $\tau = 250$  суток позволил подтвердить предварительные экспериментальные исследования и определить покрытие с улучшенными антикоррозионными свойствами.*

**Ключевые слова:** эпоксидная матрица, разрушающие напряжения при изгибе, модуль упругости при изгибе, математическое планирование эксперимента, оптимизация наполнителя, коррозия.

**Sapronov O. O., Sharanov V. D., Vorobiov P. O., Sapronova A. V., Nastasenko V. O., Palagniy V. I. THE NEWEST POLYMER MATERIALS FOR ANTI-CORROSION PROTECTION OF THE SURFACES OF SHIP CARGO AND DECK MECHANISMS**

*Epoxy diane oligomer of ED-20 brand and polyethylene polyamine PEPA hardener were used for the formation of composite materials and protective coatings on their bases. The choice of dispersed fillers is due to the presence of active groups on their surface, a set of improved characteristics of the components, which is of scientific and practical interest in the use of additives for the formation of protective coatings. The optimal content of various additives in the epoxy binder ED-20 was determined by mathematical planning using the application package STATGRAPHICS® Centurion XVI. This allowed us to predict and obtain an epoxy coating with a set of improved properties. It was found that the composite material of the following composition are characterized by improved physical and mechanical properties: a mixture of discrete organic fibers –  $q = 0.025$  wt%, anti-agglomerating additive hydropho biervnsmittel –  $q = 20$  wt%. per 100 wt%. by weight oligomer ED-20 and 10 wt% firm PEPA. Such epoxy composite material are characterized by the following properties: destructive bending stress –  $\sigma_{32} = 92.6$  MPa, flexural modulus –  $E = 5.6$  GPa. Based on the mathematical planning of the experiment, the variants of coatings that were tested for corrosion resistance were determined. The analysis of changes in resistivity and specific capacity of coatings for 30 days under the influence of various aggressive media (sulfuric acid and river water) at a temperature of  $T = 293 \pm 2$  K. It is established that the composite material containing: epoxy oligomer ED-20 (100 wt%), CDOW (0.025 wt%), HDBS (20 wt%), hardener polyethylene polyamine PEPA (10 wt%) due to the formation of a diffusion barrier in the volume of the protective coating is characterized by the*

*highest the value of resistivity and the lowest value of specific capacity in all aggressive environments. This indicates improved anti-corrosion properties of the coating. Visual analysis of defects, which was carried out in natural conditions under the influence of river water and variable temperatures in the range  $\Delta T = (258... 298) \pm 2 K$  for  $\tau = 250$  days allowed to confirm previous experimental studies and to determine coatings with improved anticorrosive properties.*

**Keywords:** *epoxy matrix, destructive bending stresses, modulus of elasticity in bending, mathematical planning of the experiment, filler optimization, corrosion.*

© Сапронов О. О., Шаранов В. Д., Воробйов П. О., Сапронова А. В., Настасенко В. О., Палагній В. І.

Статтю прийнято  
до редакції 20.09.21

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ, МЕХАНІЧНИХ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТУРБОНАГНІТАЧАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

**Шарко О. В.**, д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: avsharko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6400-8528;

**Клевцов К. М.**, д.т.н., професор кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, ORCID: 0000-0001-9836-3296;

**Акімов О. В.**, к.т.н., доцент, декан факультету суднової енергетики, доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: akimoffsasha@hotmail.com, ORCID: 0000-0001-8613-2837;

**Степанчиков Д. М.**, к.ф.-м.н., доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: dmitro\_step75@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5027-2213;

**Шарко А. О.**, к.т.н., аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: sharko\_artem@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6350-7189.

*Представлено методологію та результати визначення залишкового ресурсу турбонагнітачів методами неруйнівних випробувань. На основі синтезу результатів взаємозв'язку акустичних та механічних властивостей матеріалів та узагальнення досвіду експлуатації турбонагнітачів розроблено систему діагностики технічного стану матеріалів турбонагнітачів. Отримано граничну криву області працездатності матеріалу конструкції турбонагнітача у координатах відносної деформації аж до руйнування. Виконавши вимірювання щільності сигналів акустичної емісії та користуючись граничними кривими можна визначити відповідні значення залишкового ресурсу. Умовою працездатності є невихід траєкторії навантаження за межі області визначення стану працездатності конструкції. Користуючись представленими залежностями можна визначити значення деформаційних характеристик матеріалу за даними АЕ вимірювань. Показано, що щільність акустико-емісійного сигналу при вимірюваннях залишкової деформації при розтягу та згині відрізняються на порядок. Це дає можливість за допомогою частотної фільтрації окремо виділити низько та високочастотні складові акустико-емісійного сигналу та визначити таким чином відносні деформації згину та розтягу на основі єдиного інформаційного сигналу. Запропоновано схему розміщення датчиків акустичної емісії при контролі залишкового ресурсу підшипників і валопроводів турбонагнітачів NR34/S 102 головного двигуна MAN B&W9L 32/40. Висока інформативність та точність визначення залишкового ресурсу матеріалів за результатами акустичних вимірювань дозволяє підвищити рівень ідентифікації стану матеріалів. Для збудження та прийому акустичних хвиль можуть бути використані безконтактні електромагнітно-акустичні перетворювачі або перетворювачі з сухим точковим контактом. Це дозволяє проводити аналіз та інтерпретацію даних або безпосередньо на судні, або шляхом передачі даних до центру віддаленої діагностики каналами радіозв'язку. Отримані результати можуть служити модельним представленням вивчення властивостей та прогнозування залишкового ресурсу конструкцій.*

**Ключові слова:** акустична емісія, турбонагнітач, залишковий ресурс, ідентифікація стану.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.059-073**

**Постановка проблеми.** Вартість морських транспортних суден досягає десятків мільйонів доларів США. На суднові енергетичні установки припадає до 10...30% цієї вартості. Період будівництва одного судна триває близько року, а нормативний термін служби – 20...25 років. Протягом терміну служби енергетичну установку зазвичай не змінюють, а здійснюють її безперервне технічне обслуговування і періодичні ремонти.

Надійність та працездатність експлуатації металевих конструкцій залежить від якості моніторингу технічного стану механічних властивостей матеріалів відповідно до

вимог міжнародних стандартів. Разом з тим, у процесі експлуатації в умовах невизначеності характеру та величини навантажень відбувається відхилення властивостей матеріалів від їх нормативних значень, що потребує періодичних зупинок обладнання та проведення діагностичних робіт.

Необхідність оцінки залишкового ресурсу визначається, якщо відпрацьовано розрахунковий термін служби устаткування, при наближенні термінів нормативної технічної діагностики, при відхиленнях у режимах експлуатації, при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт.

Відмова обладнання в період його експлуатації є наслідком погіршення його міцнісних та функціональних параметрів, що відбувається внаслідок природних, фізичних та фізико-хімічних процесів у матеріалах. Відхилення від цих станів знижує безпеку експлуатації та ресурс, що робить завдання контролю, діагностики та прогнозування параметрів міцності експлуатаційного обладнання у реальному масштабі часу особливо актуальним.

**Метою роботи** є дослідження методів діагностування залишкового ресурсу турбонагнітача головного двигуна судна в процесі його експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** по визначеній проблемі показує, що серед засобів технічної діагностики особливе місце відводиться акустичним методам і зокрема методам акустичної емісії. Визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій з використанням явища акустичної емісії (АЕ) представлено у [1]. В [2–4] АЕ метод використаний для оцінки деградації механічних властивостей при складних деформаційних впливах, у [5–7] для оцінки запасу міцності за допомогою АЕ і фрактального аналізу даних, у [8–10] для визначення залишкового ресурсу пускових будівельних конструкцій космічних ракет-носіїв, у [11–13] для визначення запасу міцності конструкцій при навантаженні.

Інтерес до визначення залишкового ресурсу конструкцій у процесі їх експлуатації стимулював розробку сучасних інструментальних засобів і різноманітних технічних застосувань [14–18]. Так у [15] показано, що залишкові напруги в оброблюваних деталях мають великий вплив на втомну довговічність. Вивчено вплив залишкових напружень під час ультразвукового токарного оброблення в зоні різання. У [16] представлені результати досліджень з втомленості при високому багатоцикловому навантаженні. У [17] представлені оцінки напружено-деформованого стану пористого заліза.

Метод оцінки залишкових напруг і визначення на їх основі залишкового ресурсу використаний для оцінки якості при циклічних навантаженнях [18]. В [19] оцінка залишкових напруг використана для прогнозування динамічного модуля гарячої суміші асфальту при дослідженні автомобільних доріг і проектуванні дорожніх покриттів. В [20] отримано рівняння для прогнозу максимального напруження бетонних дренажних трубопроводів, схильних до різних ушкоджень і складних умов експлуатації. У [21] методи оцінки залишкового ресурсу використані при дослідженні міцності на стиск для цементних композитів з фазовим переходом, у [22] – для прогнозування енергоефективності та продуктивності сонячного дистилятора. У [23] представлений моніторинг стану конструкцій при проникненні металу в скло і кераміку під час термоциклічного старіння за допомогою фемтолазерного датчика на волоконній бреггівській решітці.

За останні роки значно зросла кількість робіт, що демонструють можливості акустичної емісії в неруйнівному контролі, моніторингу, виявленні несправностей зносу і відмов станів конструкцій. Аналіз різних принципів акустичної емісії і їх застосовності до оцінки залишкових напруг викладено в [24]. У [25] представлено моделювання акустичної емісії, викликаной динамічним зрушенням рідини в режимі мастила і впливом нерівностей поверхонь в умовах експлуатації. У [26] представлена онлайн-локалізація джерела акустичної емісії в бетонних конструкціях з використанням ітераційних і еволюційних алгоритмів. В [27] описана діагностика і прогноз несправностей підшипників колісних пар

високошвидкісних поїздів з використанням методів вібрації і акустичної емісії при безперервному моніторингу стану підшипників. Складена класифікація несправностей при низьких, середніх і високих швидкостях для створення відповідної бази даних і бази знань.

Проведений аналіз існуючих методів і засобів визначення залишкового ресурсу в реальному масштабі часу без зупинок устаткування показав, що оскільки величина навантаження є невизначеною, при інтенсивній експлуатації обладнання в умовах пікових навантажень, цілком використовувати наявний досвід для технології визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій в умовах комбінованого навантаження за даними акустико-емісійних вимірювань не представляється можливим [2].

Однією з проблем, що обмежує впровадження акустико-емісійного методу для контролю залишкового ресурсу обладнання є відсутність кількісного зв'язку результатів діагностики з залишковим ресурсом виробів, крім того, більшість робіт присвячено впливу на матеріал одного виду деформацій у той час як при експлуатації конструкції матеріал піддається комплексному впливу складних навантажень.

**Матеріали та методика дослідження.** Найбільш ефективним і раціональним засобом підвищення потужності двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) є використання газотурбінного наддуву, під яким розуміється подача повітря в циліндри під тиском (у результаті чого підвищується ваговий заряд повітря) за рахунок використання енергії відпрацьованих газів. У всіх чотиритактних суднових ДВЗ попереднє стиснення повітря відбувається за допомогою відцентрового компресора, який приводиться в дію газовою турбіною, що працює на відпрацьованих газах дизеля. Сукупність компресора та газової турбіни є турбонагнітачем.

Компресор турбонагнітача являє собою одноступеневий відцентровий компресор із лопатевим дифузором. Вихлопний газ від головного двигуна надходить на робоче колесо турбіни через сопловий апарат. Робочі лопатки закручені, мають бандаж та ялинкове кріплення на колесі. Колінчастий вал захищається від гарячих газів кожухом, а робоче колесо компресора – шаром ізоляції та діафрагмою.

Газова частина турбокомпресору, складається із радіально-осьового колеса, яке розташовано у корпусі. Вихлопні гази від двигуна поступають до робочого простору газової турбіни по газопроводу, після чого за допомогою соплового апарату, зменшується тиск і збільшується швидкість газу, також газам надається кут подачі на колесо турбіни. Колесо турбіни посаджене на одному валу із колесом компресору.

Ущільнення валу газової частини турбонагнітача лабіринтового типу. Функція лабіринтового ущільнення полягає у тому, щоб запобігти прориву газів із робочої камери газової частини, що призведе до втрати тиску та забруднення мастила, яке подається до опорних підшипників. Для покращення роботи ущільнень по каналу, подається повітря під тиском із камери компресору.

Для оцінки стану працездатності конструкцій, що експлуатуються в даний момент часу необхідне не тільки визначення механічних властивостей, але і визначення властивостей, чутливих до локальних структурних змін, що проявляються в мікропластичній деформації та змінах локальних мікронапруг. Міцні властивості знижуються не тільки зі зростанням терміну експлуатації, але і при посиленні силових умов.

Безаварійна експлуатація елементів турбонагнітачів залежить від якості моніторингу їх технічного стану і реалізації фізичних методів діагностики. Аналіз ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах полягає в систематичному використанні всієї доступної інформації для ідентифікації небезпек і небажаних подій.

Як показує досвід, експлуатації морських суден основним завданням діагностування є визначення технічного стану головних двигунів і енергетичних установок. У табл. 1 наведено дані щодо відносної частоти відмов елементів суднових двигунів внутрішнього згоряння.

Таблиця 1 – Статистика розподілу відмов за підсистемами ДВЗ

<i>Вузол ДВЗ</i>	<i>Відносна частота відмови</i>
Втулка циліндра	0,042
Кришка циліндрів	0,017
Клапанний механізм	0,072
Привід механізму газорозподілу	0,032
Паливний насос	0,090
Форсунка	0,105
Турбокомпресор	0,054
Трубопровід високого тиску	0,096
Кривошипно шатунний механізм	0,096
Колінвал та підшипники	0,021
Повітророзподільник	0,014
Навісні механізми	0,121
Інші	0,240

Нормальна робота головного двигуна залежить від правильного функціонування його основних підсистем та елементів циліндропоршневої групи, паливної апаратури, газотурбонагнітача, підшипників тощо. Наведені дані підтверджують потребу впровадження нових технічних засобів діагностування. Відмовлення елементів суднової енергетичної установки (СЕУ) можна класифікувати на випадкові та закономірні. На ефективність роботи двигуна впливає робота його вузлів, агрегатів та систем, у тому числі системи турбонаддуву. На систему наддуву припадає найбільша кількість відмов, що впливає на питому витрату палива, вартість ремонту та технічного обслуговування, а також на готовність дизеля до роботи. Статистика показує, що на кожні 1000 годин роботи в середньому припадає приблизно 3,5 % від загальної кількості їх зупинок через відмови газотурбонагнітачів. Розподіл відмов по різних вузлах турбокомпресорів представлено в табл. 2. Основними вузлами та елементами турбокомпресорів, що виходять з ладу, є: підшипники, ущільнення, ротор та корпус.

У практиці ідентифікації стану елементів суднового устаткування використовують візуальний огляд, гідравлічні випробування, методи дефектоскопії, технологічні і механічні випробування. Візуальний огляд і гідравлічні випробування використовуються для визначення причин пошкоджень. Дефектоскопію проводять, як на судні так і під час ремонту.

Залишковий ресурс обладнання – це сумарне напрацювання обладнання від моменту проведення контролю технічного стану до переходу в граничний стан. Завдання ідентифікації стану та визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій у процесі експлуатації передбачає спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопиченні пошкоджень.

Таблиця 2 – Розподіл (у %) відмов по різних вузлах турбокомпресорів

<i>Деталь турбокомпресора</i>	<i>Відсоток відмов</i>
Корпус	9,0
Компресор	0,5
Турбіна	4,8
Ущільнення	16,7
Ротор	15,2
Підшипники	43,8
Масляні насоси	10,0

Теорія визначення механічних властивостей матеріалів заснована на вивченні напружено-деформованого стану. Механічні властивості структурно-чутливі. Їх визначають, піддаючи тіло руйнуванню або необоротної деформації.

Недоліками існуючих комплексів діагностики і визначення остаточного ресурсу є:

- статичність;
- необхідність обліку великої кількості різноманітних показників;
- обмеження в часі і просторі, на яких розповсюджується рішення;
- неповнота і неадекватність інформації;
- низька якість прогнозних оцінок;
- неоднозначність причинно-наслідкових зв'язків;
- низька продуктивність діагностики;
- необхідність сканування і підготовки поверхні для контролю.

Боротьба з цими недоліками може бути проведена за рахунок вимірювань, створення методик ідентифікації та моделювання, програмного та математичного забезпечення.

Існує неослабний інтерес до процесу визначення стану металевих конструкцій в умовах невизначеності. Однак існуючі методики та алгоритми призначені для вирішення часткових питань діагностики і мають ряд обмежень, так як не враховують великого різноманіття параметрів і умов, які мають місце в процесі експлуатації обладнання.

Інтерес до визначення залишкового ресурсу конструкцій у процесі їх експлуатації стимулював розробку сучасних інструментальних засобів і багатий перелік технічних застосувань.

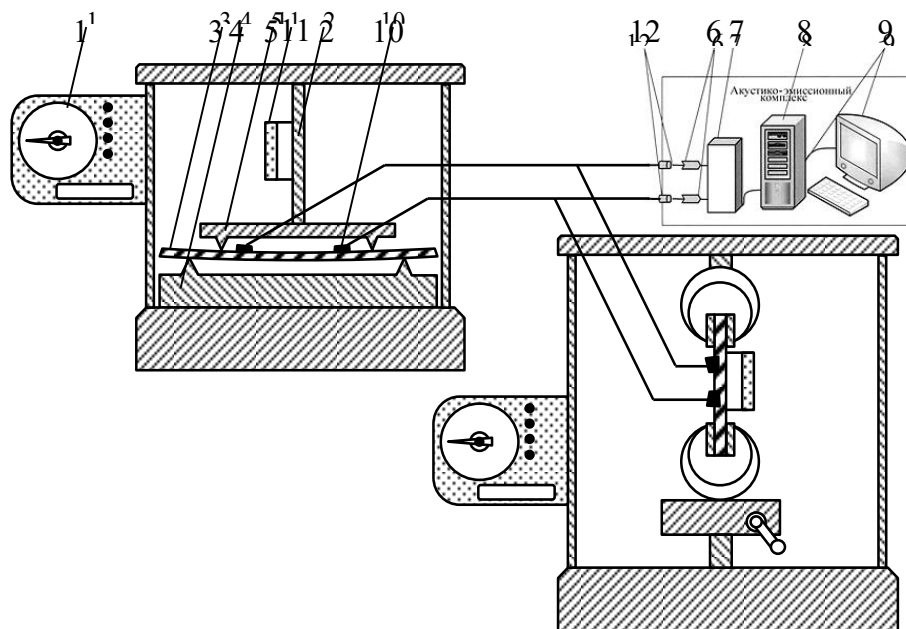


Рисунок 1 – Блок-схема експериментальної установки для АЕ вимірювань при випробуваннях на розтяг і чотириточковий згин:

1 – механізм силовимірювача, 2 – механізм деформування, 3 – контрольований зразок, 4 – опора, 5 – індентор, 6 – блок фільтрів, 7 – аналого-цифровий перетворювач, 8 – блок накопичення та обробки інформації, 9 – реєструючий пристрій, 10 – п'єзоелектричний датчик, 11 – тензомер, 12 – блоки попереднього посилення.

Можливості, які пов'язані з дистанційним використанням методу АЕ, дають великі переваги порівняно з іншими методами неруйнівного контролю, що вимагають, наприклад, відсутності необхідності видалення ізоляційних оболонок, звільнення контейнерів для контролю від внутрішнього змісту для діагностики або сканування великих контрольованих поверхонь без зупинки обладнання для проведення діагностики.

Однією з проблем, що обмежують ефективність технічної діагностики, та визначення залишкового ресурсу турбоагнітачів у процесі їх експлуатації в умовах

складних динамічних навантажень є відсутність кількісних результатів діагностики з залишковим ресурсом виробів.

Для діагностики залишкового ресурсу турбонагнітачів була зібрана експериментальна установка, в якій ідентифікація структурних особливостей накопичення пошкоджень і руйнувань матеріалів по даним АЕ здійснювалась на основі аналізу ступеня деформування зразків, отриманих при дослідженні на розривній машині УМ5 і машині для випробувань на згин МПП-10 [28, 29]. Основною вимогою до експерименту є рівність значень середньоквадратичних похибок при вимірюваннях на розтяг та згин. У цій роботі ця умова дотримується за рахунок єдиного реєструючого блоку з цифровою індикацією АЕ сигналів (рис. 1).

У вимірювальній установці використовувалися широкосмугові акустичні датчики до акустико-емісійного приладу АФ15. Реєстрація сигналів після посилення до 90 Дб виконувалася запам'ятовуючим осцилографом RIGOL DS1052E Digital oscilloscope. При цьому проводився запис сигналів у цифровому форматі. Вимірювання деформації визначалося шляхом фіксації видовження за допомогою мікрометричного електронного індикатора переміщення Micron digital indicator DT-7011. Синхронно реєструвалося параметри деформування і моменти виникнення сигналів АЕ.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Результати експерименту представлені у табл. 3 [28, 29].

Таблиця 3 – Експериментальні значення фізико-механічних характеристик при розтягу та згині

<i>Сила навантаження F, Н</i>	<i>Щільність АЕ сигналу N, 10<sup>8</sup> с<sup>-1</sup></i>	<i>Напруження <math>\sigma</math>, МПа</i>	<i>Видовження (прогин) l, мм</i>	<i>Відносна деформація <math>\varepsilon</math>, %</i>
Розтяг				
16867,44	0,47	281,1	0,375	0,17
18436,50	0,40	307,3	0,463	0,20
18828,77	0,19	313,8	0,477	0,21
19711,37	0,16	328,5	0,577	0,26
20103,63	0,55	335,1	0,591	0,27
20495,90	0,41	341,6	0,705	0,32
20888,16	0,33	348,1	0,737	0,33
21182,36	0,65	353,0	1,923	0,86
21280,43	0,44	354,7	4,189	1,88
23535,96	0,29	392,3	11,022	4,94
25497,29	0,25	424,9	13,330	5,98
29419,95	0,22	490,3	17,390	7,80
Згин				
166,71	1,39	93,8	6,511	1,13
196,13	1,02	110,4	6,815	1,19
264,78	1,37	149,0	8,011	1,39
372,65	1,92	209,7	14,011	2,44
377,56	1,88	212,4	14,312	2,49
386,38	1,86	217,4	14,823	2,59
392,27	1,54	218,7	15,418	2,69
460,91	1,66	234,5	23,901	4,17
465,82	1,73	235,3	24,030	4,19

Моменти виникнення сигналів АЕ представлені не у вигляді часових відліків, що є похибкою експериментальної установки, а у вигляді стрибків амплітуди АЕ сигналу на діаграмі навантаження, фіксованих за шкалою силового пристрою, що є реакцією матеріалу на навантаження.

Як аналізована акустична характеристика була обрана щільність АЕ сигналу N, яка обчислювалася за формулою:

$$N = \frac{N_{\Sigma}}{t_n}, \quad (1)$$

де  $N_{\Sigma}$  – кількість перетинів граничного рівня сигналу АЕ,  $t$  – час індикації сигналу.

Цей параметр для сталі при деформації розтягу на порядок відрізняється від такого при деформації згину. При комплексному характері поздовжнього розтягу та поперечного згину ця властивість дозволить чітко визначити тип деформації у зразку  $\varepsilon_p$  або  $\varepsilon_z$  для розтягу та згину. Вид таких залежностей наведено на рис. 2 [1, 2].

Завдання ідентифікації стану та визначення залишкового ресурсу металевих конструкцій у процесі експлуатації передбачає спостереження за зміною механічних властивостей матеріалів при накопиченні пошкоджень, в якості яких обрана деформація поверхонь виробу при навантаженні.

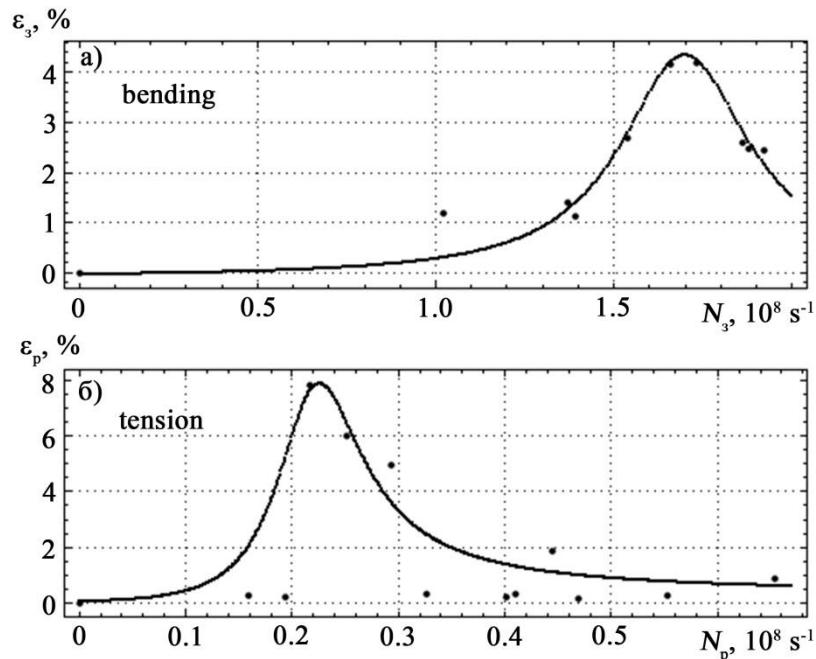


Рисунок 2 – Залежності відносної деформації ( $\varepsilon$ ) від щільності АЕ сигналів ( $N$ ) для згину (а) і розтягу (б)

При оцінці працездатності металевих конструкцій методами АЕ доводиться вирішувати обернену задачу за значеннями АЕ сигналів у моменти реєстрації виникнення явища АЕ визначити величини навантажень на виріб. Це може бути виконано з використанням апроксимаційних поліномів.

Апроксимаційні поліноми залежностей відносної деформації від густини АЕ сигналів  $\varepsilon_p(N)$  або  $\varepsilon_z(N)$  для розтягу та згину мають вигляд:

$$\varepsilon_p(N) = \frac{-0.094N^2 + 0.348N - 0.108}{N^2 - 3.394N + 2.929}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_z(N) = \frac{0.238N^2 + 0.022N + 0.002}{N^2 - 0.436N + 0.049}. \quad (3)$$

При апроксимації отримана крива, що згладжує, зовсім не обов'язково проходить через всі вузлові точки і являє собою загальну тенденцію і закономірність.

Значення коефіцієнтів детермінації апроксимаційних поліномів дорівнюють 0,9799 для розтягу та 0,9683 для згину. Значення середньоквадратичних похибок становлять 0,2762 для розтягу та 0,9683 для згину. При отриманні цих значень використовувався пакет програм Matematica 9.0.

Очікуваний ефект від впровадження процесу визначення стану металевих конструкцій полягає в:

- збільшенні міжремонтного періоду роботи;
- підвищенні експлуатаційного ККД обладнання;
- забезпеченні надійності устаткування;
- зменшенні затрат на технічне обслуговування;
- спостереженні за станом безперервного працюючого обладнання.

При багатопараметричному навантаженні для визначення запасу міцності слід враховувати як змінюються параметри деформації при зміні параметрів навантаження щодо граничного стану. Гранична крива області працездатності конструкцій у складних умовах представлена на рис. 3.

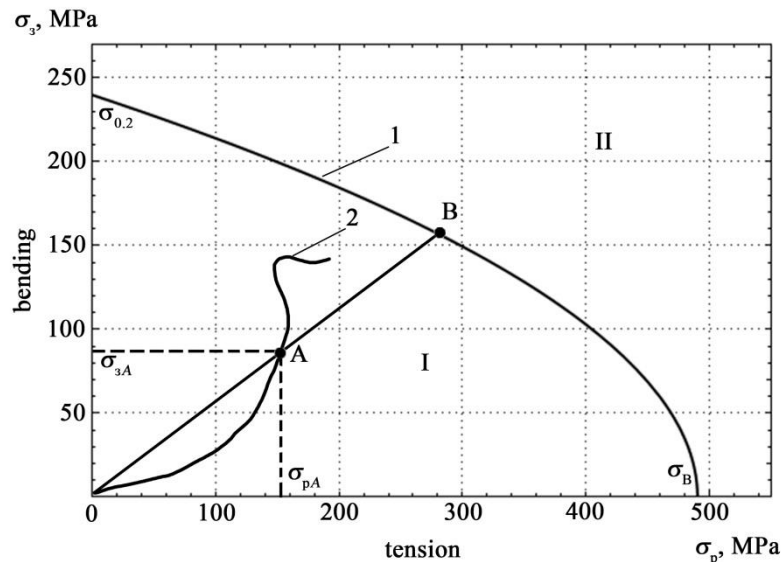


Рисунок 3 – Гранична крива 1 та траєкторія навантаження 2 в координатах механічної напруги (I – область працездатності, II – область руйнування)

Для довільної точки *A* геометрично коефіцієнт залишкового ресурсу дорівнює відношенню відрізка *OB* до відрізка *OA*:

$$\lambda = \frac{OB}{OA} \geq 1. \tag{4}$$

В області існування закону Гука напруга пропорційна деформації, однак у періоди експлуатації, коли можлива наявність пікових навантажень та відхилень від нормативних технологічних параметрів використання обладнання, крива напруга-деформація виходить за область закону Гука. Тому рис. 3 має бути перебудований у координатах  $\varepsilon_s = f(\varepsilon_p)$  аж до руйнування. Такий графік представлений на рис. 4 у вигляді граничної кривої, що відокремлює область працездатності від руйнування.

Аналіз рис. 4 показує, що на граничній кривій є дві чітко виражені ділянки з різним характером залежності  $\varepsilon_s = f(\varepsilon_p)$ : перша ділянка характеризується швидкою зміною деформації розтягу при незначних змінах деформації згину та відповідає значенням відносної деформації розтягу в діапазоні  $\varepsilon_p \in (0; 0,34)$  та згину в діапазоні  $\varepsilon_s \in (0,8; 4,19)$ , друга ділянка характеризується повільною зміною деформації розтягу при великих змінах деформації згину та відповідає значенням відносної деформації розтягу в діапазоні  $\varepsilon_p \in (0,34; 7,8)$  та згину в діапазоні  $\varepsilon_s \in (0; 0,8)$ .

Умовою працездатності є невихід траєкторії навантаження за межі області визначення стану працездатності конструкції. Користуючись представленими залежностями можна визначити значення деформаційних характеристик матеріалу за даними АЕ вимірювань.

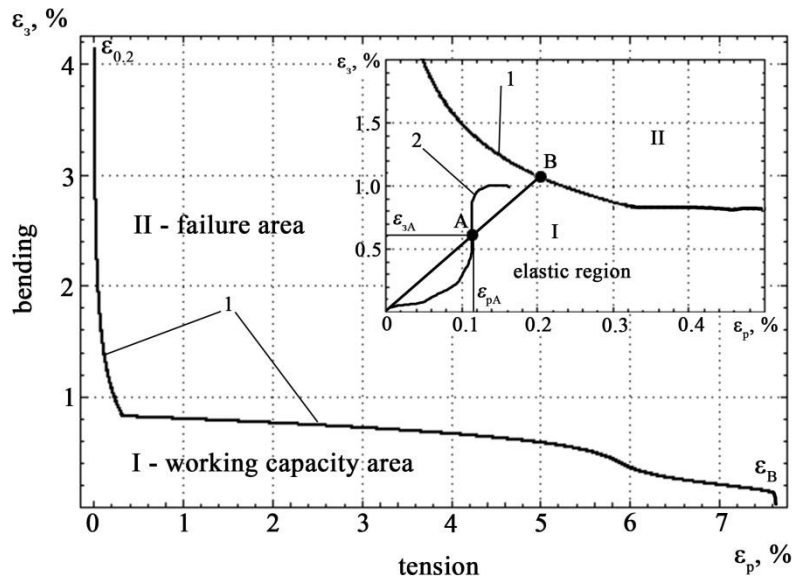


Рисунок 4 – Гранична крива 1 у координатах відносної деформації (I – область працездатності, II – область руйнування), на вставці показано ділянку граничної кривої 1, що відповідає зоні пружної деформації та траєкторія можливого навантаження 2

Виконавши вимірювання щільності АЕ сигналів, користуючись граничними кривими можна визначити відповідні значення залишкового ресурсу. Для цього необхідно нанести на графік рис. 4 координати точки *A*, які відповідають відносній деформації при навантаженні за даними АЕ вимірювань і провести через цю точку з початку координат промінь до перетину з граничною кривою. Визначивши таким чином положення точки *A* можна знайти коефіцієнт залишкового ресурсу  $\lambda$  через відношення відрізків *OB* до *OA*.

Оскільки АЕ вимірювання залишкової деформації при розтягу та згині відрізняються на порядок, то внесок кожної зі складових у координату точки *A*, який визначається за щільністю імпульсів АЕ сигналу, буде відрізнятися і за частотою. Використання в експериментальній установці частотного фільтра дозволяє окремо виділити низько та високочастотні складові АЕ сигналу, визначивши таким чином  $\varepsilon_p$  та  $\varepsilon_3$ .

Розміщення АЕ датчиків при контролі залишкового ресурсу підшипників і валопроводів турбонагнітачів NR34/S 102 головного двигуна MAN B&W9L 32/40 передбачає їх встановлення у лабиринтному ущільненні компресорної частини, у притискній втулці підшипника ковзання та у лабиринтному ущільненні турбінної частини.

При оцінці залишкового ресурсу та діагностування технічного стану виробів необхідно використовувати заздалегідь призначені контрольні рівні надійності. Технічний стан валів та підшипників турбін діагностується за рівнями надійності:

- надійний рівень справного технічного стану, в якому інтервал коефіцієнта залишкового ресурсу  $\lambda=1,3 \dots 1,1$ ;
- частково надійний рівень  $\lambda=1,1 \dots 1,0$ ;
- аварійний рівень, який характеризує стан сухого тертя підшипників, що призводить їх до поломки,  $\lambda=1$  і менше.

При створенні системи ідентифікації стану залишкового ресурсу турбонагнітачів з використанням методу акустичної емісії необхідне виконання наступних етапів:

- на основі досвіду експлуатації встановлювати причини, що призводять до відмов обладнання;
- виявляти діагностичні параметри об'єктів;
- встановлювати зв'язки діагностичних параметрів з технічним станом об'єкта;
- встановлювати граничне значення параметрів, що характеризують перехід контрольованого об'єкта в інший клас технічного стану;

- розробляти методи вимірювання діагностичних параметрів;
- визначати обсяги, періодичність та послідовність випробувань.

Збільшення діагностичних сигналів пропорційне збільшенню зносу, втрати безпеки та зменшенню залишкового ресурсу агрегату.

Для збудження та прийому акустичних хвиль можуть бути використані безконтактні електромагнітно-акустичні перетворювачі або перетворювачі з сухим точковим контактом. Це дозволяє проводити аналіз та інтерпретацію даних або безпосередньо на судні, або шляхом передачі даних до центру віддаленої діагностики каналами радіозв'язку.

Моніторинг стану за основними параметрами дозволяє полегшити підтримку працездатності суднового обладнання у морі та зменшити обсяг техобслуговування. Діагностична система моніторингу акустичних параметрів турбонагнітача може складатися зі змінної кількості інтелектуальних вимірювачів стану вузлів, центрального комп'ютера, розташованого на борту судна та віддаленого комп'ютера на березі з можливістю конфігурації та аналізу АЕ сигналів через Інтернет.

При вимірюваннях у реальних умовах роботи турбонагнітача датчик АЕ сприймає не тільки сигнал, що несе корисну інформацію, але і сторонні сигнали викликані високою віброактивністю працюючих агрегатів. Для виділення корисної інформації в експериментальній установці застосована фільтрація сигналів. Це дозволяє виділити корисний сигнал за допомогою часової селекції.

Встановлено, що стан матеріалів валів та підшипників турбін залежить від ударів та вібрації. При експлуатації виробів суднової енергетичної установки моменти зіткнення різних деталей і механізмів відбуваються в певні проміжки часу або при обертальному русі в певні кутові проміжки фазового стану механізму. Включаючи реєструючу апаратуру тільки в моменти виникнення корисного сигналу можна значно зменшити кількість факторів, що заважають діагностиці в процесі експлуатації.

Отримані експериментальні результати дозволяють вирішити завдання моніторингу технічного стану елементів турбонагнітачів. Для цього потрібно розробити діагностичну модель. Діагностична модель встановлює зв'язок між станом системи та її відображенням у просторі діагностичних сигналів. Діагностичними параметрами можуть бути: сила тертя, тепловиділення, інтенсивність зношування, вібрації та ін. Структурними параметрами можуть бути: фізико-механічні властивості мастильних матеріалів; фізико-механічні характеристики вузлів тертя та ін.

### **Висновки**

1. Отримані експериментальні результати дозволяють вирішити завдання моніторингу технічного стану елементів турбонагнітачів. Для цього необхідно виконати вимірювання щільності АЕ сигналів, за якими, користуючись залежностями  $\varepsilon=f(N)$  для розтягу та згину визначити відповідні значення залишкових деформацій, за якими можна знайти величину залишкового ресурсу та запасу міцності матеріалу турбонагнітачів. Підвищення точності прогнозних оцінок величини залишкового ресурсу можна досягти використанням апроксимаційних поліномів.

2. Отримані результати можуть служити модельним уявленням вивчення властивостей і прогнозування залишкового ресурсу конструкцій. Створені засоби технологічного та інформаційного забезпечення процесів діагностики в умовах невизначеності характеру і величини навантажень дозволяють отримати деформаційні і міцнісні характеристики матеріалів не залежно від форми і виду навантаження.

3. Висока інформативність і точність визначення залишкового ресурсу матеріалів за результатами АЕ вимірювань дозволяє підвищити рівень ідентифікації стану і діагностики матеріалів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Marasanov V., Stepanchikov D., Sharko A., Sharko O. Technology for Determining the Residual Life of Metal Structures Under Conditions of Combined Loading According to Acoustic Emission Measurements. *Data Stream Mining & Processing*. 2020. V. 1158. P. 202–217.
2. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials* 2021, V. 14, N 9. P. 2090.
3. Lyasota I., Sarniak Ł., Kustra P. Acoustic emission analysis of the plastic deformation stages of degraded low-carbon steel after long-term operation in the oil refining and petrochemical processing. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2019. V. 64, N 1. P. 143–151.
4. Nedoseka A.Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A., Yeremenko M. A., Gereb Ya., Kushnirenko S. A. Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tech. Diagn. Non Destr. Test*. 2016. N 3. P. 3–10.
5. Porziani S., Augugliaro G., Brini F., Brutti C., Chiappa A., Groth C., Mennuti C., Quaresima P., Salvini P., Zanini A., Biancolini M.E. Structural integrity assessment of pressure equipment by Acoustic Emission and data fractal analysis. *Procedia Structural Integrity*. 2020. N 25. P. 246–253.
6. Chisari, C., Guarnaccia, C., Rizzano, G. Numerical simulation of acoustic emission activity in reinforced concrete structures by means of finite element modelling at the macroscale (2020) *Structural Health Monitoring*. 2020. V. 19, N 2. P. 537–551.
7. Nedoseka A., Nedoseka S., Markashova L., Kushnareva O. On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tech. Diagn. Nondestr. Test*. 2016. N 4. P. 9–13.
8. Thor M., Plasser H., Nagler M., Maier F., Hinterhölzl R.M., Sause M. G. R. Combining digital image correlation, passive thermography and acoustic emission to investigate damage initiation and propagation of out-of-plane fiber waviness *International Conferences on Composite Materials*. 2019.
9. Dai C., Cheng T., Zong L., Luo X. A study on spectrum characteristics of red sandstone acoustic emission signals based on improved EEMD. *Journal of Vibration and Shock*. 2018. V. 37, N 16. P. 118–123.
10. Sause M. G. R., Schmitt S., Kalafat S. Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission. *Composites Science and Technology*. 2018. N. 164. P. 24–33.
11. Zou Z.-Y., Liu Z.-L., Han S.-T., Li Q., Zhao S.-Y., Guo B.-F. Safety margin analysis of elastoplastic strength for a press lower beam based on shakedown. *Journal of Plasticity Engineering*. 2020. V. 27, N 12. P. 198–202.
12. Bathurst R. J., Miyata Y., Allen T. M. Deterministic and probabilistic assessment of margins of safety for internal stability of as-built PET strap reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*. 2020. V. 48, N6. P. 780–792.
13. Liepa L., BlazeVICIUS G., MerkeVICIUTE D., Atkociunas J. Structural shakedown: a new methodology for estimating the residual displacements. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2016. V. 22, N 8. P. 1055–1065.
14. NogueroL, T. M., Barousse, R., Amrhein, T. J., Royuela-Del-val, J., Montesinos, P., Luna, A. Optimizing diffusion-tensor imaging acquisition for spinal cord assessment. *Physical basis and technical adjustments Radiographics*. 2020. V. 40, N2, P. 403–427.
15. Khajehzadeh M., Boostanipour O., Reza Razfar M. Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in ultrasonic assisted turning. *Ultrasonics* 2020. V. 108, art. no. 106208.
16. Шибков А. А., Золотов А. Е., Желтов М. А. Акустический предвестник неустойчивой пластической деформации алюминий-магниевого сплава АМгб. *Физика твердого тела*. 2010. Т. 52, №11. С.2223–2231.
17. Поляков В. В., Егоров А. В., Свистун И. Н. Акустическая эмиссия при деформации пористого железа. *Письма в журнал технической физики*, 2001. Т.27, № 11, С.14–18.

18. Скальський В. Р., Станкевич О. М., Клим Б. П., Почапський Є. П. Особливості програмного забезпечення акустико-емісійних засобів діагностування. *Техн. діагностика та неруйн. контроль*. 2010. №3, С. 5–13.
19. Moussa, G. S., Owais, M. Pre-trained deep learning for hot-mix asphalt dynamic modulus prediction with laboratory effort reduction. *Construction and Building Materials*. 2020. N 265, art. no. 120239.
20. Li, B., Guo, X., Fang, H., Ren, J., Yang, K., Wang, F., Tan, P. Prediction equation for maximum stress of concrete drainage pipelines subjected to various damages and complex service conditions. *Construction and Building Materials*. 2020. N 264, art. no. 120238.
21. Marani, A., Nehdi, M. L. Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 2020. N 265, art. no. 120286.
22. Nazari, S., Bahiraei, M., Moayedi, H., Safarzadeh, H. A proper model to predict energy efficiency, exergy efficiency, and water productivity of a solar still via optimized neural network. *Journal of Cleaner Production*. 2020. N 277, art. no. 123232.
23. Fan, Z., Diao, X., Hu, K., Zhang, Y., Huang, Z., Kang, Y., Yan, H. Structural health monitoring of metal-to-glass ceramics penetration during thermal cycling aging using femto-laser inscribed FBG sensors. *Scientific Reports*. 2020. V.10, N1, art. no. 12330.
24. He, Y., Li, M., Meng, Z., Chen, S., Huang, S., Hu, Y., Zou, X. An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. N148, art. no. 107146.
25. Ma, J., Zhang, H., Shi, Z., Chu, F., Gu, F., Ball, A.D. Modelling Acoustic Emissions induced by dynamic fluid-asperity shearing in hydrodynamic lubrication regime. *Tribology International*. 2021. N 153, art. no. 106590.
26. Mirgal, P., Pal, J., Banerjee, S. Online acoustic emission source localization in concrete structures using iterative and evolutionary algorithms. *Ultrasonics*. 2020. N 108, art. no. 106211.
27. Xu, G., Hou, D., Qi, H., Bo, L. High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: A new prognostic model based on extendable useful life. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. N 146, art. no. 107050.
28. Алексенко В. Л., Шарко А. А., Сметанкин С. А., Степанчиков Д. М., Юренин К. Ю. Обнаружение акустико-эмиссионных эффектов при повторном нагружении образцов из стали СтЗсп. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. 2017. №4. С. 25–31.
29. Алексенко В. Л., Шарко А. А., Шарко А. В., Степанчиков Д. М., Юренин К. Ю. Идентификация структурных особенностей механизмов деформирования при изгибе методом акустической эмиссии. *Техн. диагностика и неразруш. контроль*. 2019. №1. С. 32–39.

## REFERENCES

1. Marasanov V., Stepanchikov D., Sharko A., Sharko O. (2020). Technology for Determining the Residual Life of Metal Structures Under Conditions of Combined Loading According to Acoustic Emission Measurements. *Data Stream Mining & Processing*, V. 1158. 202–217.
2. Louda P., Sharko A., Stepanchikov D. (2021). An Acoustic Emission Method for Assessing the Degree of Degradation of Mechanical Properties and Residual Life of Metal Structures under Complex Dynamic Deformation Stresses. *Materials*, V. 14, N 9. 2090.
3. Lyasota I., Sarniak Ł., Kustra P. (2019). Acoustic emission analysis of the plastic deformation stages of degraded low-carbon steel after long-term operation in the oil refining and petrochemical processing. *Archives of Metallurgy and Materials*, V. 64, N 1. 143–151.
4. Nedoseka A. Ya., Nedoseka S. A., Ovsienko M. A., Yeremenko M. A., Gereb Ya., Kushnirenko S. A. (2016). Testing of pressure vessels by an international expert team. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N 3. 3–10.

5. Porziani S., Augugliaro G., Brini F., Brutti C., Chiappa A., Groth C., Mennuti C., Quaresima P., Salvini P., Zanini A., Biancolini M.E. (2020). Structural integrity assessment of pressure equipment by Acoustic Emission and data fractal analysis. *Procedia Structural Integrity*, N 25. 246–253.
6. Chisari, C., Guarnaccia, C., Rizzano, G. (2020). Numerical simulation of acoustic emission activity in reinforced concrete structures by means of finite element modelling at the macroscale (2020) *Structural Health Monitoring*, V. 19, N 2. 537–551.
7. Nedoseka A., Nedoseka S., Markashova L., Kushnareva O. (2016). On identification of structural changes in materials at fracture by acoustic emission data. *Tech. Diagn. Nondestr. Test.*, N 4. 9–13.
8. Thor M., Plasser H., Nagler M., Maier F., Hinterhölzl R. M., Sause M. G. R. (2019). Combining digital image correlation, passive thermography and acoustic emission to investigate damage initiation and propagation of out-of-plane fiber waviness *International Conferences on Composite Materials*.
9. Dai C., Cheng T., Zong L., Luo X. (2018). A study on spectrum characteristics of red sandstone acoustic emission signals based on improved EEMD. *Journal of Vibration and Shock.*, V. 37, N 16. 118–123.
10. Sause M.G.R., Schmitt S., Kalafat S. (2018). Failure load prediction for fiber-reinforced composites based on acoustic emission. *Composites Science and Technology*, N. 164. 24–33.
11. Zou Z.-Y., Liu Z.-L., Han S.-T., Li Q., Zhao S.-Y., Guo B.-F. (2020). Safety margin analysis of elastoplastic strength for a press lower beam based on shakedown. *Journal of Plasticity Engineering*, V. 27, N 12. 198–202.
12. Bathurst R. J., Miyata Y., Allen T. M. (2020). Deterministic and probabilistic assessment of margins of safety for internal stability of as-built PET strap reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, V. 48, N 6. 780–792.
13. Liepa L., BlazeVICIUS G., MerkeVICIUTE D., Atkociunas J. (2016). Structural shakedown: a new methodology for estimating the residual displacements. *Journal of Civil Engineering and Management*, V. 22, N 8. 1055–1065.
14. Noguerol, T. M., Barousse, R., Amrhein, T. J., Royuela-Del-val, J., Montesinos, P., Luna, A. (2020). Optimizing diffusion-tensor imaging acquisition for spinal cord assessment. *Physical basis and technical adjustments Radiographics*. V. 40, N2. 403–427.
15. Khajehzadeh M., Boostanipour O., Reza Razfar M. (2020). Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in ultrasonic assisted turning. *Ultrasonics*. V. 108, art. no. 106208.
16. Shibkov A. A., Zolotov A. E., Zheltov M. A. (2010). Acoustic precursor of unstable plastic deformation in the aluminum-magnesium alloy AMg6. *Physics of the Solid State*. V. 52, N11. 2223–2231.
17. Polyakov V. V., Egorov A. V., Svistun I. N. (2001). Deformation-induced acoustic emission from porous iron. *Technical Physics Letters* V. 27, N11. 937–939.
18. Skalskii V. R., Stankevich O. M., Klim B. P., Pochapskii E. P. (2010). Features of software of acoustic-emission diagnostic means. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N3. 5–13.
19. Moussa, G. S., Owais, M. (2020). Pre-trained deep learning for hot-mix asphalt dynamic modulus prediction with laboratory effort reduction. *Construction and Building Materials*. N 265, art. no. 120239.
20. Li, B., Guo, X., Fang, H., Ren, J., Yang, K., Wang, F., Tan, P. (2020). Prediction equation for maximum stress of concrete drainage pipelines subjected to various damages and complex service conditions. *Construction and Building Materials*. N 264, art. no. 120238.
21. Marani, A., Nehdi, M. L. (2020). Machine learning prediction of compressive strength for phase change materials integrated cementitious composites. *Construction and Building Materials*. N 265, art. no. 120286.

22. Nazari, S., Bahiraei, M., Moayedi, H., Safarzadeh, H. (2020). A proper model to predict energy efficiency, exergy efficiency, and water productivity of a solar still via optimized neural network. *Journal of Cleaner Production*. N 277, art. no. 123232.
23. Fan, Z., Diao, X., Hu, K., Zhang, Y., Huang, Z., Kang, Y., Yan, H. (2020). Structural health monitoring of metal-to-glass ceramics penetration during thermal cycling aging using femto-laser inscribed FBG sensors. *Scientific Reports*. V.10, N1, art. no. 12330.
24. He, Y., Li, M., Meng, Z., Chen, S., Huang, S., Hu, Y., Zou, X. (2021). An overview of acoustic emission inspection and monitoring technology in the key components of renewable energy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*. N148, art. no. 107146.
25. Ma, J., Zhang, H., Shi, Z., Chu, F., Gu, F., Ball, A.D. (2021). Modelling Acoustic Emissions induced by dynamic fluid-asperity shearing in hydrodynamic lubrication regime. *Tribology International*. N 153, art. no. 106590.
26. Mirgal, P., Pal, J., Banerjee, S. (2020). Online acoustic emission source localization in concrete structures using iterative and evolutionary algorithms. *Ultrasonics*. N 108, art. no. 106211.
27. Xu, G., Hou, D., Qi, H., Bo, L. (2021). High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: A new prognostic model based on extendable useful life. *Mechanical Systems and Signal Processing*. N 146, art. no. 107050.
28. Aleksenko V., Sharko A., Smetankin S., Stepanchikov D., Yurenin K. (2017). Detection of Acoustic-Emission Effects During Reloading of St3sp Steel Specimens. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N4. 25–31.
29. Aleksenko V.; Sharko A.; Sharko A.; Stepanchikov D.; Yurenin K. (2019). Identification by Acoustic Emission Method of Structural Features of Deformation Mechanisms at Bending. *Tech. Diagn. Non Destr. Test.*, N1. 32–39.

**Шарко А. В., Клевцов К. Н., Акимов А. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. А. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ ОСТАЛЬНОГО РЕСУРСА, МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОНАГНИТАТЕЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*Представлены методология и результаты определения остаточного ресурса турбонагнетателей методами неразрушающих испытаний. На основе синтеза результатов взаимосвязи акустических и механических свойств материалов и обобщения опыта эксплуатации турбонагнетателей разработана система диагностики технического состояния материалов турбонагнетателей. Получена граничная кривая области работоспособности материала конструкции турбонагнетателя в координатах относительной деформации вплоть до разрушения. Условием работоспособности является невыход траектории нагрузки за пределы области определения состояния работоспособности конструкции. Используя представленные зависимости можно определить значение деформационных характеристик материала по данным АЭ измерений. Выполнив измерение плотности сигналов акустической эмиссии, и пользуясь граничными кривыми можно определить соответствующие значения остаточного ресурса. Показано, что плотности акустико-эмиссионного сигнала при измерениях остаточной деформации при растяжении и изгибе отличаются на порядок. Это позволяет с помощью частотной фильтрации отдельно выделить низко и высокочастотные составляющие акустико-эмиссионного сигнала и определить относительные деформации изгиба и растяжения на основе единого информационного сигнала. Предложена схема размещения датчиков акустической эмиссии при контроле остаточного ресурса подшипников и валопроводов турбонагнетателей NR34/S 102 главного двигателя MAN B&W9L 32/40. Высокая информативность и точность определения остаточного ресурса материалов по результатам акустических измерений позволяет повысить уровень идентификации состояния материалов. Для возбуждения и приема акустических волн могут использоваться бесконтактные электромагнитно-акустические преобразователи или преобразователи с сухим точечным контактом. Это позволяет проводить анализ и интерпретацию данных либо непосредственно на судне, либо путем передачи данных в центр удаленной диагностики по каналам радиосвязи. Полученные результаты могут служить модельным представлением для изучения свойств и прогнозирования остаточного ресурса конструкций.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, турбонагнетатель, остаточный ресурс, идентификация состояния.

**Sharko O. V., Klevtsov K. M., Akimov O. V., Stepanchikov D. M., Sharko A. O. IDENTIFICATION OF THE STATE OF THE REMAINING RESOURCE, MECHANICAL AND THERMODYNAMIC PROCESSES IN TURBOCHARGER USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD**

*The methodology and results of determining the residual life of turbochargers by non-destructive testing methods are presented. The system of technical condition diagnostics of materials of turbochargers on the basis of synthesis of results of acoustic interrelation and mechanical properties of materials and generalization of operation experience of turbochargers is developed. The boundary curve of the efficiency region of the turbocharger construction material in the coordinates of relative deformation up to fracture is obtained. The corresponding values of the residual resource are determined by measuring the density of acoustic emission signals and using limit curves. The condition of working capacity is the failure of the load trajectory outside the area of determining the state of performance of the structure. Using the presented dependences it is possible to define values of deformation characteristics of material according to AE of measurements. It is shown that the density of the acoustic emission signal when measuring the residual strain during tension and bending differ by an order of magnitude. This makes it possible to separate the low and high frequency components of the acoustic emission signal by means of frequency filtering and to determine the relative bending and tensile deformations on the basis of a single information signal. The scheme of placement of sensors of acoustic emission at control of a residual resource of bearings and shaft lines of turbochargers NR34 / S 102 of the main engine MAN B&W9L 32/40 is offered. High informativeness and accuracy of determining the residual life of materials based on the results of acoustic measurements allows to increase the level of identification of the state of materials. Non-contact electromagnetic-acoustic transducers or dry point contact transducers can be used to excite and receive acoustic waves. This allows the analysis and interpretation of data either directly on board or by transmitting data to a remote diagnostic center via radio. The obtained results can serve as a model representation of studying the properties and forecasting the residual life of structures.*

**Keywords:** acoustic emission, turbocharger, residual life, state identification.

© Шарко О. В., Клевцов К. М., Акімов О. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. О.

Статтю прийнято  
до редакції 21.10.21

***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***

***AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES***

## ЭСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Голощанов С. С.,** к.т.н., доцент, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: goloschapov46@gmail.com

*При разработке сложной измерительной системы часто бывает необходимым оценить ее динамические параметры с целью определения быстродействия, что является особо актуальным при создании автоматических средств измерения. При этом подобные структуры часто имеют в своем составе усилители или аттенюаторы, управляемые напряжением, которые фактически осуществляют операцию умножения сигналов. С целью применения структур, используемых в теории автоматического управления (ТАУ), такие элементы заменяются на сумматоры логарифмов с последующим потенцированием. Для линеаризации операций логарифмирования и потенцирования их приближенно представляют как операции вычитания и сложения линейных функций. Аналогичным способом выражаются и другие нелинейные операции измерительных звеньев. Полученные структуры представляются как схемы ТАУ с последующим составлением их передаточных функций, на основе которых определяется переходная характеристика системы в целом. В качестве примера применения приведенного метода рассматривается схема измерителя емкости варикапов на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов измерения, содержащая генератор высокой частоты, емкостной делитель, в состав которого включен измеряемый варикап, управляемый усилитель, два канала измерения, каждый из которых содержит усилитель высокой частоты и детектор, вычитающее устройство, устройство сравнения, источник опорного напряжения. Один из каналов измерения охвачен отрицательной обратной связью, второй содержит вычитающее устройство, благодаря которому на его выходе формируется сигнал, пропорциональный измеряемой емкости. Показано, как можно рассчитать быстродействие приведенной схемы при скачкообразном изменении напряжения смещения, подаваемого на измеряемый варикап через элемент развязки. Предложенный метод приближенного вычисления быстродействия измерительных систем достаточно прост и эффективен и позволяет значительно упростить определение динамических параметров не только измерительных, но и систем управления, содержащих звенья, которые осуществляют операции умножения или деления сигналов.*

**Ключевые слова:** измерительная система, управляемый усилитель, передаточная функция, переходная характеристика.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.075-082**

**Вступление.** При разработке и проектировании сложной измерительной системы часто бывает необходимым оценить ее динамические параметры с целью определения быстродействия, что является особо актуальным при создании автоматических средств измерения. Примером такой системы может служить схема измерителя емкости на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов измерения [1, 2], содержащая в себе интегрирующие цепи, обладающие запаздыванием, и каскад, охваченный отрицательной обратной связью.

Поскольку к настоящему времени не существует единой методики определения динамических параметров подобных систем, на вооружение приходится брать методы, используемые в других смежных отраслях науки и техники.

Наиболее применимой для изучения динамики процессов следует считать теорию автоматического управления (ТАУ) [3, 4]. Однако методы классической теории ТАУ в своих структурных схемах оперируют, в основном, сумматорами и двухполосниками с различными статическими и динамическими характеристиками [5, 6]. При этом отсутствуют перемножающие элементы – такие, как часто встречающиеся в измерительной технике, усилители с управляемым коэффициентом усиления [7, 8, 9] или управляемые делители сигналов [10, 11]. Последние тоже можно рассматривать как управляемые усилители с коэффициентом передачи  $k_n < 1$ . В таких усилителях операцию умножения сигналов можно заменить операцией сложения логарифмов этих сигналов с последующим потенцированием.

Однако указанные операции являются нелинейными, что значительно усложняет расчет быстродействия, поэтому с целью преобразования рассматриваемой системы в линейную, операции умножения и деления можно заменить приближенными линейными функциями:

$$e^x \approx x+1; \quad \ln x \approx x-1. \quad (1)$$

Действительно, разложение показательной и логарифмической функции в степенной ряд дает [12]:

$$e^x = 1 + \frac{x}{1!} + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots; \quad \ln x = -1 + x - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \dots,$$

откуда, ограничиваясь первыми двумя членами приведенных рядов, получаем выражения (1).

Аналогичным способом можно представить и другие нелинейные операции измерительных звеньев.

**Целью статьи** является разработка оперативного метода приближенной оценки быстродействия сложных измерительных систем на основе преобразования измерительных структур с множительными элементами для получения типов звеньев, используемых в ТАУ.

**Основная часть.** В случае, если все звенья схемы удастся линеаризировать (с некоторыми допущениями), руководствуясь принципом суперпозиции, единицу в выражениях (1) можно опустить и тогда операцию умножения можно приближенно представить как операцию сложения, а операцию деления – как операцию вычитания.

Далее, используя приемы и методы преобразования схем в ТАУ и зная передаточные функции отдельных элементов и звеньев схемы, определяют передаточную функцию системы в целом, по которой можно найти ее переходную характеристику.

Как пример реализации рассмотрим уже упомянутую схему (рис. 1) измерения емкости на основе емкостного делителя с пространственным разделением каналов [1, 2]. При этом в качестве измеряемой емкости  $C_x$  используется полупроводниковая емкость (варикап), управляемая от источника напряжения смещения (на схеме не показан).

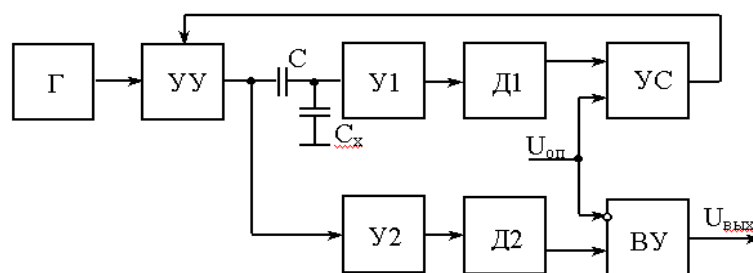


Рисунок 1 – Измеритель емкости с емкостным делителем и пространственным разделением каналов:

Г – генератор высокой частоты; УУ – управляемый усилитель; У1, У2 – усилители высокой частоты; Д1, Д2 – детекторы; ВУ– вычитающее устройство; УС – устройство сравнения,  $U_{оп}$  – опорное напряжение

В этой схеме между генератором высокой частоты и делителем включен управляемый усилитель, коэффициент усиления которого пропорционален управляющему напряжению. Поскольку схема охвачена обратной связью, будет справедливо равенство

$$U_z k_y \frac{C}{C + C_x} k_{y1} = U_{on}, \quad (2)$$

где  $U_g$  – напряжение генератора Г,  $k_y$  – коэффициент усиления управляемого усилителя УУ,  $C$  – величина емкости делителя С,  $C_x$  – емкость испытуемого варикапа,  $k_{y1}$  – коэффициент передачи усилителя У1 и детектора Д1.

Поскольку вход второго усилителя У2 подключен к выходу УУ, на выходе детектора Д2 получим:

$$U_{Д2} = U_g k_y k_{y2},$$

где  $k_{y2}$  – коэффициент передачи усилителя У2 и детектора Д2.

С учетом (2):

$$U_{Д2} = U_{on} \frac{C + C_x}{C} \cdot \frac{k_{y2}}{k_{y1}}.$$

Примем  $k_{y1} = k_{y2}$ .

Тогда на выходе вычитающего блока ВУ получим:

$$U_{вых} = U_{Д2} - U_{on} = U_{on} \frac{C_x}{C},$$

сигнал, пропорциональный измеряемой емкости, поскольку все остальные величины, входящие в полученное выражение – постоянные.

Рассмотрим, как изменяется выходной сигнал во времени при скачкообразном изменении управляющего напряжения смещения. При этом все остальные параметры схемы (напряжение высокочастотного генератора, опорное напряжение) будем считать постоянными. Также считаем, что все звенья схемы можно линеаризировать. Тогда с учетом сказанного и цепи напряжения смещения с измеряемым варикапом схема примет вид (рис.2).

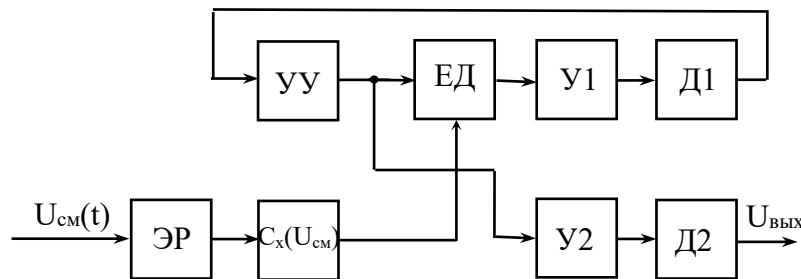


Рисунок 2 – Схема анализа переходного процесса при входном воздействии напряжением смещения:

УУ – управляемый усилитель, ЕД – емкостной делитель; У1, У2 – усилители; Д1, Д2 – детекторы; ЭР – элементы развязки по цепи смещения;  $C_x(U_{см})$  – функциональная зависимость емкости варикапа от напряжения смещения (вольтфарадная характеристика)

Учитывая, что коэффициент передачи емкостного делителя  $k_{ЕД} = \frac{1}{1 + \frac{C_x}{C}}$ ,

представим полученное выражение в виде  $\frac{1}{1+x}$ , разлагая которое в степенной ряд [12] и

ограничиваясь первыми двумя членами ряда, получаем  $k_{ЕД} \approx 1 - \frac{C_x}{C}$ .

Функциональную зависимость  $C_x = f(U_{см})$  приближенно выразим в виде зависимости  $C_x \approx \frac{A}{U_{см}}$ , где  $A$  – постоянная величина.

С учетом этого схема примет вид (рис. 3):

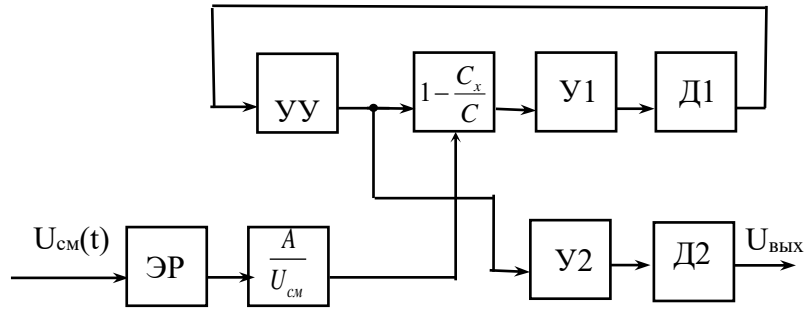


Рисунок 3 – Структурная схема с учетом коэффициента передачи емкостного делителя и зависимости емкости варикапа от напряжения смещения

Адаптируя приведенную схему под структуры ТАУ, получим (рис. 4):

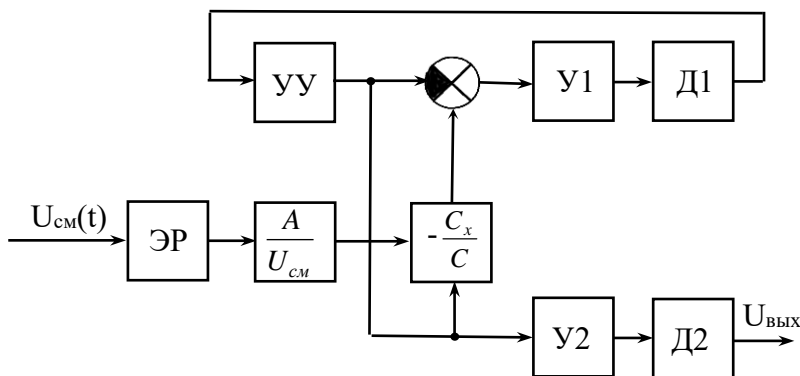


Рисунок 4 – Схема, адаптированная под структуры ТАУ

Заменяя операции умножения (деления) на сложение (вычитание) логарифмов с последующим потенцированием, получаем.

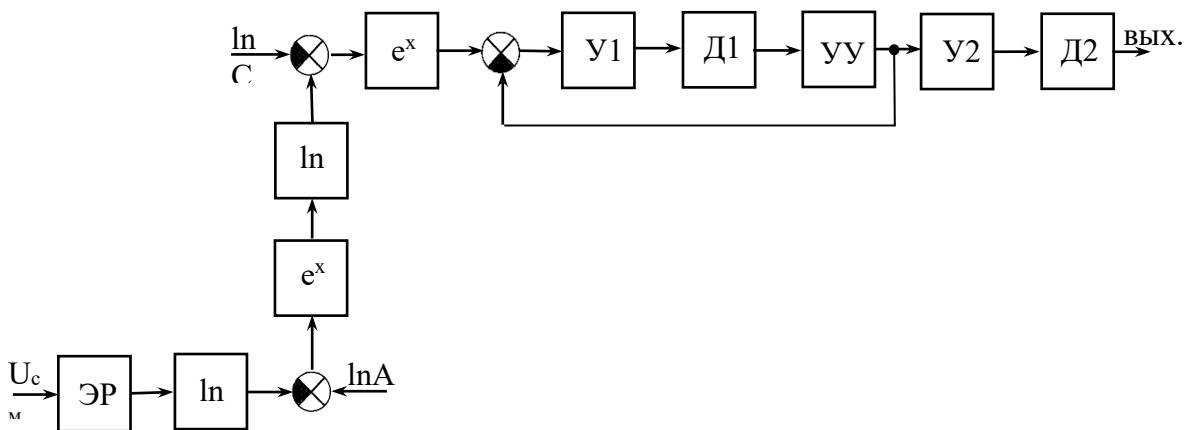


Рисунок 5 – Замена операций умножения (деления) на сложение (вычитание) логарифмов

Заменим логарифмирование и потенцирование их приближенными функциями.

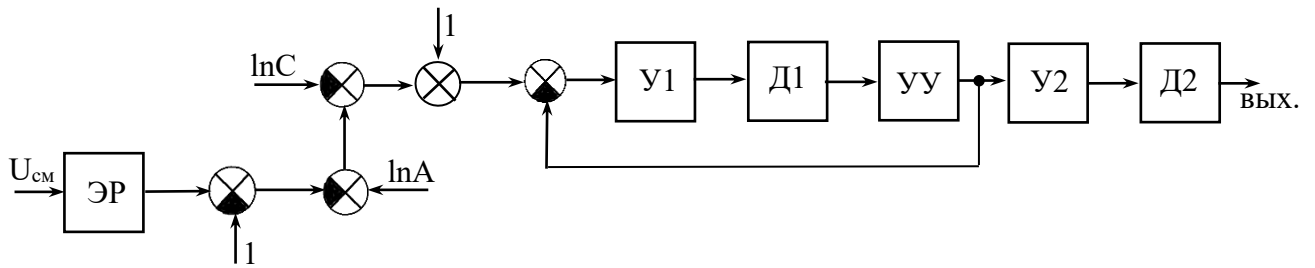


Рисунок 6 – Замена операций логарифмирования (потенцирования) их приближенными функциями

Поскольку все звенья, входящие в схему, представляют собой линейные функции, входящие постоянные величины можно опустить. С учетом этого имеем:

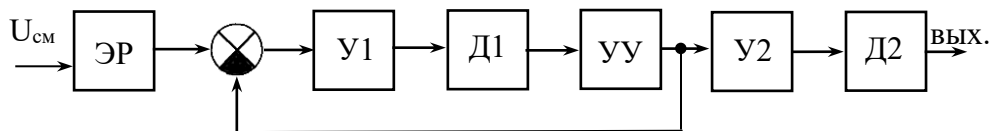


Рисунок 7 – Результирующая схема замещения

Пусть  $W_1(p)$  – передаточная функция канала У1-Д1;  $W_2(p)$  – передаточная функция канала У2-Д2;  $W_p(p)$  – передаточная функция цепи развязки,  $k_y$  и  $k_{oc}$  – соответственно передаточные коэффициенты управляемого усилителя УУ и канала обратной связи – безинерционных звеньев. Тогда общая передаточная функция схемы равна

$$W(p) \approx W_p(p) \frac{W_1(p)k_y}{1 + W_1(p)k_y k_{oc}} W_2(p). \quad (3)$$

Цепь развязки (RC-цепь), детекторы Д1 и Д2 представим в виде аperiodических звеньев с передаточными функциями

$$W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1}, \quad W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}, \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad (4)$$

где  $k_p, k_1, k_2$  – коэффициенты передачи цепи развязки, первого и второго детекторов соответственно;  $T_p, T_1, T_2$  – постоянные времени этих же звеньев.

В случае измерения на частоте 1 МГц постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  детекторов Д1 и Д2 измеряются долями миллисекунд. Поэтому подставив (4) в (3), пренебрегая членами высшего порядка малости и полагая для простоты  $k_y = k_{oc} = 1$ , где  $k_{oc}$  – коэффициент обратной связи, получим:

$$W(p) \approx \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \frac{0,5k_1}{0,5T_1 p + 1} \cdot \frac{k_2}{T_2 p + 1}. \quad (4)$$

Анализ полученного выражения приводит к выводу, что рассматриваемая измерительная система ведет себя как реальное интегрирующее звено с постоянной времени:

$$T \approx T_p + 0,5T_1 + T_2. \quad (4)$$

**Выводы.** Рассмотренный метод приближенного вычисления быстродействия измерительной системы достаточно прост и эффективен и может использоваться для оперативной оценки быстродействия на стадии проектирования и оптимизации параметров системы в целом. Приведенная методика использования приемов ТАУ в случае применения в схемах усилителей с управляемым коэффициентом усиления или аттенюаторов позволяет значительно упростить вычисление быстродействия не только измерительных, но и любых других систем, содержащих звенья, которые осуществляют операции умножения и (или) деления.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голощапов С. С. Измерение емкости методом емкостного делителя. *Электрический журнал*. Запоріжжя : Науково-виробниче підприємство «Альфа-Омега», 2000. №2(12). С.23–26.
2. Патент 10410 Україна. МПК G01R 27/26 (2006/01) / Пристрій для контролю параметрів варикапів: заявник і власник патенту Херсонський національний технічний університет. № u200503868; заявл. 22.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. №11.
3. Исаев Е. А., Чернецкая И. Е. *Основы теории автоматического управления* : учебное пособие для практической подготовке на судах кадетов-электромехаников. Херсон : ХГМА, 2013. 252 с.
4. Ротач В. Я. *Теория автоматического управления* : учебник для вузов. Москва : Издательский дом МЭИ, 2008. 396 с.
5. Роцин А. В. *Основы теории автоматического управления* : учебное пособие. М.: МГУПИ, 2007. 100 с.
6. Коновалов, Б. И., Лебедев Ю. М. *Теория автоматического управления* : учебное пособие. Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. 163 с. URL : <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208587>.
7. Ефимов И. П. *Операционные усилители*. Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2000. 72 с.
8. Веселов В. А. и др. *Аналоговые микросхемы преобразователей электрических сигналов и особенности их применения* : учебное пособие. СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. 161 с.
9. Усилители с электронным управлением. URL : [http://radiomaster.ru/stati/radio/su\\_1.php](http://radiomaster.ru/stati/radio/su_1.php).
10. Джонс М. Х. *Электроника* : практический курс. М. : Постмаркет, 1999. 528 с.
11. Управляемый напряжением аттенюатор. URL : <https://russianelectronics.ru/upravlyaemuj-napryazheniem-attenuator/>.
12. Выгодский М. Я. *Справочник по высшей математике*. М. : АСТ: Астрель, 2006. 991 с.

### REFERENCES

1. Goloshchapov S. S. Capacitance measurement by the capacitive divider method / S.S. Goloshchapov //: Electric magazine. – Zaporizhzhya: Scientific-virobniche enterprise "Alpha-Omega" 2000. – No. 2 (12). S. 23–26.
2. Patent 10410 Ukraine. IPC G01R 27/26 (2006/01) / Adjustment for control of varicap parameters: applicant and owner of the patent Kherson National Technical University. – № u200503868; declared 04/22/2005; publ. 15.11.2005, bull. No. 11.
3. Isaev E. A. Fundamentals of the theory of automatic control: a textbook for practical training on ships of cadets-electromechanics.- 2nd ed. revised and add. / E. A. Isaev, I. E. Chernetskaya - Kherson, KSMA, 2013 . – 252 p.

4. Rotach V. Ya. Automatic control theory: textbook for universities – 5th ed., Revised. and add. - M. : Publishing house MEI, 2008 . – 396 p.
5. Roshchin A. V. Foundations of the theory of automatic control. Textbook / A. V. Roshchin. – M. : MGUPI, 2007 . – 100 p.
6. Konovalov, BI Theory of automatic control: textbook / BI Konovalov, Yu. M. Lebedev - Tomsk: Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2010. - 163 p. : ill., table., schemes. – Access mode: by subscription. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=208587> – Text: electronic.
7. Efimov I. P. Operational amplifiers / I. P. Efimov - Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2000. – 72 p.
8. Veselov V. A. and other Analog microcircuits of electrical signal converters and features of their application: a tutorial. / V. A. Veselov – Balt. state tech. un-t – SPb, 2009 – 161 p.
9. Amplifiers with electronic control. – Access mode: [http://radiomaster.ru/stati/radio/su\\_1.php](http://radiomaster.ru/stati/radio/su_1.php).
10. Jones M. H. Electronics - a practical course. / M. H. Jones – M., Postmarket, 1999 . – 528 p.
11. Voltage controlled attenuator. Access mode: <https://russianelectronics.ru/upravlyaemyj-napryazheniem-attenyuator/>.
12. Vygodsky M. Ya. Handbook of Higher Mathematics / M.Ya. Vygodsky – M.: AST: Astrel, 2006. – 991 p.

#### **Голощاپов С. С. ЕКСПРЕС-МЕТОД ОЦІНКИ ШВИДКОДІЇ СКЛАДНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

*При розробці складної вимірювальної системи часто буває необхідним оцінити її динамічні параметри з метою визначення швидкодії, що є особливо актуальним при створенні автоматичних засобів вимірювання. При цьому подібні структури часто мають у своєму складі підсилювачі або атенюатори, керовані напругою, які здійснюють операцію множення сигналів. З метою застосування структур, що використовуються в теорії автоматичного управління (ТАУ), такі елементи замінюються на суматори логарифмів з подальшим потенціюванням. Для лінеаризації операцій логарифмування та потенціювання їх наближено представляють як операції віднімання та складання лінійних функцій. Аналогічним способом виражаються інші нелінійні операції вимірювальних ланок. Отримані структури представляються як схеми ТАУ з наступним складанням їх передавальних функцій, на основі яких визначається перехідна характеристика системи в цілому. Як приклад застосування наведеного методу розглядається схема вимірювача ємності варикапів на основі ємнісного дільника з просторовим поділом каналів вимірювання, що містить генератор високої частоти, ємнісний дільник, до складу якого включений вимірюваний варикап, керований підсилювач, два канали вимірювання, кожний з яких містить підсилювач високої частоти, пристрій, що віднімає, пристрій порівняння, джерело опорної напруги. Один з каналів вимірювання охоплений негативним зворотним зв'язком, другий містить пристрій, що віднімає, завдяки якому на його виході формується сигнал, пропорційний вимірюваній ємності. Показано, як можна розрахувати швидкодію наведеної схеми при стрибкоподібній зміні напруги зсуву, що подається на вимірюваний варикап через елемент розв'язки. Запропонований метод наближеного обчислення швидкодії вимірювальних систем досить простий і ефективний і дозволяє значно спростити визначення динамічних параметрів не тільки вимірювальних, а й систем управління, що містять ланки, які здійснюють операції множення або поділу сигналів.*

*Ключові слова: вимірювальна система, керований підсилювач, передатна функція, перехідна характеристика.*

#### **Goloschapov S. S. EXPRESS METHOD OF EVALUATION OF SPEED OF COMPLEX MEASURING SYSTEMS**

*When developing a complex measuring system, it is often necessary to evaluate its dynamic parameters in order to determine the speed of response, which is especially important when creating automatic measuring instruments. Moreover, such structures often include voltage-controlled amplifiers, which actually carry out the operation of signal multiplication. In order to apply the structures used in the theory of automatic control (TAU), such elements are replaced by adders of logarithms with subsequent potentiation. To linearize the operations of logarithm and potentiation, they are approximately represented*

*as operations of subtraction and addition of linear functions. Other non-linear operations of the measuring units are expressed in a similar way. The resulting structures are presented as TAU circuits with the subsequent compilation of their transfer functions, on the basis of which the transient response of the system as a whole is determined. As an example of the application of the above method, a circuit for measuring the capacitance of varicaps based on a capacitive divider with spatial separation of measurement channels is considered, containing a high-frequency generator, a capacitive divider, which includes a measured varicap, a controlled amplifier, two measurement channels containing high-frequency amplifiers and detectors, subtractor, comparison device, reference voltage source. One of the measurement channels is covered by negative feedback, the second contains a subtractor, due to which a signal proportional to the measured capacitance is generated at its output. It is shown how the speed of the given circuit can be calculated with an abrupt change in the bias voltage supplied to the measured varicap through the decoupling element. The proposed method for the approximate calculation of the speed of the measuring systems is quite simple and effective and makes it possible to significantly simplify the determination of the dynamic parameters of not only measuring, but also control systems containing links that carry out the operations of multiplying or dividing signals.*

**Keywords:** *measuring system, controlled amplifier, transfer function, transient characteristic.*

© Голощанов С. С.

Статтю прийнято  
до редакції 11.11.21

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ КЛАСИФІКАТОР АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДОКУМЕНТІВ

**Жученко О. А.**, д.т.н., професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: azhuch@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5611-6529;

**Коротинський А. П.**, phd, асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: ihfantkor@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6309-5970;

**Цапар В. С.**, к.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: cwst@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8347-7941;

**Федотов В. В.**, ст. викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: dmb92@i.ua, ORCID: 0000-0001-7821-0989

*Робота спрямована на вирішення прикладної задачі розробки автоматичної системи обробки електронних документів, а саме однієї з її частин - класифікатора. Для вирішення поставленої задачі запропоновано використовувати підходи машинного навчання та штучного інтелекту. Вирішення поставленої задачі при звичайних умовах не складає труднощів, проте в даній роботі розглядається випадок обмеженості навчальної вибірки, що є поширеним випадком при розробці систем на базі запропонованих підходів. У роботі проведено дослідження початкових даних на основі яких буде проведено навчання моделі та визначено кількість класів, що будуть розпізнаватись, кількість представників у кожному класі та досліджено особливості їх представлення. У роботі представлено підходи, застосування яких дозволяє збільшити точність систем такого типу, в умовах обмеженості початкової початкової вибірки. Серед запропонованих підходів розглядається принцип мінімізації параметрів при формуванні архітектури штучної нейронної мережі, аугментація даних, переднавчання штучної нейронної мережі шляхом застосування автоенкодера. Отримана точність у 94-95 %, після застосування запропонованих підходів на відміну від 70 % початкових, підтверджує можливість оперативної розробки аналогічних класифікаторів такого типу, при обмеженій вибірці та в умовах мінімізації часу, з досягненням високих показників точності.*

*Ключові слова:* нейронні мережі, аргументація, автоенкодер, переднавчання, класифікатор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.083-091

**Вступ.** У даний час, діяльність будь яких закладів і установ неможлива без організації документообігу. Необхідність отримання документів, перевірки достовірності, внесення інформації до відповідних баз даних і т.д., займає багато часу операторів відповідних систем, а також необхідно враховувати людський фактор. Заміна етапів ручної обробки програмною дозволить зменшити час обробки документів та прибере вплив людського фактору на точність виконання робіт. З чого випливає, що вирішення прикладної задачі розробки автоматичної системи обробки документів є досить актуальною в поточний час широкого впровадження електронного документообігу.

Запропоновані системи дозволяють вирішувати ряд задач, таких як: перевірка наявності печатки або підпису, перевірка наявності та валідності дати, парсинг ключових елементів документу, тощо. У роботі вирішується задача розробки автоматичної системи обробки скан/фото атестатів, як прикладу документа, що обробляється. Опрацювання даного документа полягає у внесенні оцінок в базу даних, перерахунку середнього балу атестату та перевірки його відповідності до поданого значення з метою уникнення фальсифікації даних. Обробка великої кількості атестатів операторами, тобто ручна обробка, займає велику кількість часу та призводить до неминучих помилок операторів. Відтак, заміна етапу ручної перевірки програмною, дозволить зменшити час обробки документів та підвищить точність їх перевірки.

У даній роботі розглядається вирішення лише однієї складової системи автоматичного розпізнавання скан/фото документів, а саме класифікації зображень отриманих після опрацювання документа сегментатором, який виділяє складові документи, які потребують класифікації. Класифікатор пропонується виконати на основі штучної нейронної мережі, яка вирішує класичне завдання розпізнавання образів.

Відомо, що основна частина часу, при розробці нейронних мереж, складає саме опрацювання вхідних даних для їх зручного представлення. У даному випадку необхідно з кожного документу вирізати визначений, унікальний по своєму наповненні сегмент, який буде в подальшому оброблятися, зберегти його у новий файл та згенерувати йому відповідну мітку. Необхідно зазначити, що описана вище робота, з підготовки достатньої кількості даних для навчання нейронної мережі, потребує наявності великої кількості оригіналів документів, що обробляються, та займає досить багато часу. Для деяких завдань, забезпечення зазначених умов може бути неможливим (відсутність достатньої кількості документів для обробки), або не доцільним (час підготовки даних та навчання нейромережі в декілька разів перевищує час виконання обробки в ручному режимі). Враховуючи зазначене, а саме складність виконання умов щодо кількості вхідної інформації та часу, пропонується розробити класифікатор в умовах обмеженості вибірки, тобто зменшивши час ручної підготовки вибірки для навчання мережі. Практична реалізація штучної нейронної мережі, дослідження роботи та аналіз результатів пропонується виконати на прикладі класифікатора атестатів оцінок шкільної дванадцятибальної системи оцінювання.

Необхідність навчання моделі класифікації зображень на невеликому обсязі даних – звичайна ситуація, з якою часто стикаються в практиці розпізнавання образів за допомогою технологій комп'ютерного зору на професійному рівні. Під «невеликим» об'ємом розуміється від декількох сотень до декількох десятків тисяч зображень [1].

У цьому матеріалі розглядається проста стратегія вирішення даного завдання:

У частині 1, розроблено невелику нейронну мережу за принципом мінімізації параметрів, щоб задати базовий рівень точності класифікації. Після чого представлено варіант ефективного способу розширення початкової навчальної вибірки для задачі розпізнавання образів – data augmentation. Розглянуто два основних прийоми глибокого навчання на невеликих наборах даних: виділення ознак з використанням попередньо навченої мережі і донавчання попередньо навченої мережі.

У частині 2, буде розглянуто можливість застосування генеративно-змагальної мережі (GAN – Generative Adversarial Networks) як способу розширення початкової вибірки з метою покращення рівня точності розпізнавання. Фінальне значення точності роботи розробленої моделі буде отримано після проведення регуляризації.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є розроблення та дослідження роботи однієї із складових автоматичної системи обробки документів, а саме класифікатора, на прикладі класифікатора оцінок в атестаті, в умовах обмеженості навчальної вибірки. Робота спрямована на визначення доцільності застосування підходів підвищення рівня точності таких систем в умовах обмеженості вибірки та визначення точності роботи розробленого класифікатора після застосування запропонованих підходів.

**Аналіз існуючих літературних джерел.** На сьогоднішній день існує досить велика кількість матеріалів, що описують способи використання нейронних мереж для схожих задач. Наприклад, робота [2] присвячена розробці системи розпізнавання писемних символів за допомогою штучної нейронної мережі. Проте у самому матеріалі не описана структура нейронної мережі, а відтак не зрозумілі вимоги та потреби на її навчання.

Авторами роботи [3] досліджено основні методи використання згорткових нейронних мереж для вирішення задачі класифікації текстів. Експерименти на текстових даних великого обсягу показали, що згорткові нейронні мережі для задачі класифікації текстів дозволяють досягти якості, аналогічної або кращої в порівнянні з традиційними

методами. Проте аналогічно до вищесказаного у самому матеріалі не описана структура запропонованої нейронної мережі.

У роботі [4] описано синтез згорткової нейронної мережі для розпізнавання рукописних цифр на базі класичного датасету MNIST. Матеріали описують вирішення класичної задачі з урахуванням досить великої вибірки. При вирішенні задачі використовувався принцип регуляризації.

У роботі [5] проведено аналіз роботи чотирьох різноманітних моделей розпізнавання рукописних цифр на базі класичного датасету MNIST при навчанні даних моделей на різному по величині об'ємові вибірки, а саме 25, 50, 75 та 100 %. Навіть при 25 % об'ємові вибірки кількість екземплярів складає 15000 значень, що складно назвати обмеженим дата сетом. Проте аналогічно до вищесказаного у самому матеріалі не описана структура нейронної мережі.

У роботі [6] розглядається вдосконалення традиційного методу розпізнавання зображень на базі загорткових нейронних мереж. Було зроблено висновки, щодо доцільності вибору однієї з трьох функцій активації. З результатів дослідження зроблено висновки, що ручне коригування параметрів все ще потрібно в процесі експерименту для визначення найкращих параметрів розробки та використання нейронних мереж.

У роботі [7] представлена реалізація штучної нейронної мережі для реалізації класифікації рукописної бази даних MNIST. Крім того, у роботі, намагались досягти стиснення зображення за допомогою Autoencoder та визначити його ефективність. Це дозволяє зменшити розмір мережі та таким чином збільшують можливість покращити продуктивність її роботи. Матеріали описують вирішення класичної задачі з урахуванням досить великої вибірки.

**Аналіз навчальної вибірки.** Аналіз та опрацювання вибірки початкових даних, на основі яких буде проведено навчання моделі, є надзвичайно важливим етапом при розробці систем на базі машинного навчання. Саме на цьому етапі розробки можна визначити кількість класів, що будуть розпізнаватись, кількість їх представників, особливості представлення, тощо.

У нашому випадку об'єктом розпізнавання виступають зображення, що будуть отримані в результаті опрацювання документів сегментатором, наприклад: табелів успішності, додатків до атестату про середню освіту та інше. Зазначені документи містять у собі перелік предметів та відповідних оцінок, причому оцінки можуть бути як рукописними цифрами або словами так і друкованими (рис. 1).



Рисунок 1 – Різні типи представлення оцінок

Прийнято рішення, що друковані та рукописні екземпляри можна розглядати як один клас, оскільки дані елементи повинні мати схожі патерни. Відтак, кількість унікальних класів для запропонованої моделі складатиме 24, а саме 12 класів рукописних та друкованих словесних оцінок та 12 класів рукописних та друкованих цифр. Можлива ситуація, коли в сформованому сегментатором області з тих чи інших причин оцінки не буде, а тому для пустого поля необхідно визначити окремий клас. Відповідно до вище сказаного, попередньо для вирішення задачі класифікації було визначено 25 класів.

Попередній аналіз 30 додатків до атестатів показав, що загальна кількість унікальних за представленням (різний шрифт, почерк і т.д.) оцінок в атестатах не рівномірна для кожного з класів, а для деяких класів взагалі складає нуль. Класи, що відповідають оцінками «один», «два», «три», «1», «2», «3», «4», «5» взагалі не мають представників у вибірці 30 атестатів. Прослідковується наявність двох груп класів оцінок,

а саме: цифр та рукописних, при чому загальна кількість представників у групах відрізняється майже в 8 разів.

З попереднього аналізу даних випливає дві проблеми: відсутність представників деяких класів та нерівномірність представників поміж всіма класами.

Зрозуміло, що навчання нейронної мережі без представників деяких класів не має сенсу. Вирішення даної проблеми можливе різними способами, наприклад: розширення вибірки за рахунок існуючих датасетів, наприклад, таких як «MNIST», що не є універсальним вирішенням для схожих задач; розширення вибірки шляхом обробки більшої кількості атестатів або штучне створення представників класів. Оскільки задача вирішується саме при умові обмеженості матеріалів для навчання мережі, будемо вважати, що вже існуючих вибірок для розширення початкової вибірки, як і додаткових документів для опрацювання не існує, відтак обираємо останній варіант.

Значна нерівномірність представників поміж всіма класами передбачає, що нейромережа навчиться краще розпізнавати ті класи в яких представників більше, що також можна вирішити описаним вище варіантом. Проте, цікавим є факт, що деякі групи класів мають схожу розподіленість. Відтак можливо розробити окремо класифікатор для кожної з груп класів, що вирішить проблему нерівномірності представників поміж групами класів.

Після ручного вирівнювання розподілення представників поміж всіма класами отримано наступне представлення даних: для класів 13–24 з середнім значенням кількості представників 12, для класів 1–12 з середнім значенням кількості представників 26.

**Вибір структури нейронної мережі.** Навчання нейронної мережі – це процес оптимізації параметрів обраної моделі на навчальній вибірці з метою досягти високого рівня узагальнення, тобто точності роботи даної моделі на даних, які раніше не застосовувались.

Відомо, що найкращий спосіб отримання моделі без перенавчання, тобто, коли модель завчила всі шаблони тренувальних вибірок, що не обов'язково характерні тестовій – збільшення об'єму тренувальних даних. Модель, навчена на великому обсязі даних, матиме велику узагальненість, до того ж велика вибірка дозволяє збільшувати глибину самої мережі. З іншої сторони обмежений об'єм тренувальної вибірки обумовлює мінімізацію параметрів для навчання, а відтак глибини мережі, тобто мережі доведеться вивчати зжаті представлення. У той же час, модель повинна мати достатню кількість параметрів, щоб не виник ефект недонавчання. У зв'язку з обмеженістю даних, для розроблення нейромережі класифікації пропонується використати принцип мінімізації структури нейронної мережі.

Для вирішення класичної задачі розпізнавання малюнків зазвичай використовують добре зарекомендувавший себе підхід чередування згорткових та агрегувальних шарів. Відтак, враховуючи все вище сказане запропонована наступна структура/глибина класифікатора для розпізнавання сегментів додатків до атестатів, що складає в себе двічі чередовані згорткові (convolutional layer) та агрегувальні шари (max pooling layer), вирівнювальний шар (flatten layer) та два повноз'єднаних шара (dense layer).

Розглядається два варіанта реалізації, як один загальний класифікатор на 25 класів та два окремих класифікатора для цифр та слів.

Відповідно до сказаного вище, глибина нейронних мереж визначена, а параметри шарів такі, як кількість фільтрів, їх розміри, кількість нейронів, функції активації і т.д. підбиралися індивідуально до кожного з класифікаторів. У результаті підбору було отримано дві структури: перша структура відповідає класифікатору цифр; друга структура відповідає класифікатору слів та загальному класифікатору. Більш детальний опис структури з числовими характеристиками можна побачити на рис. 2 [8].

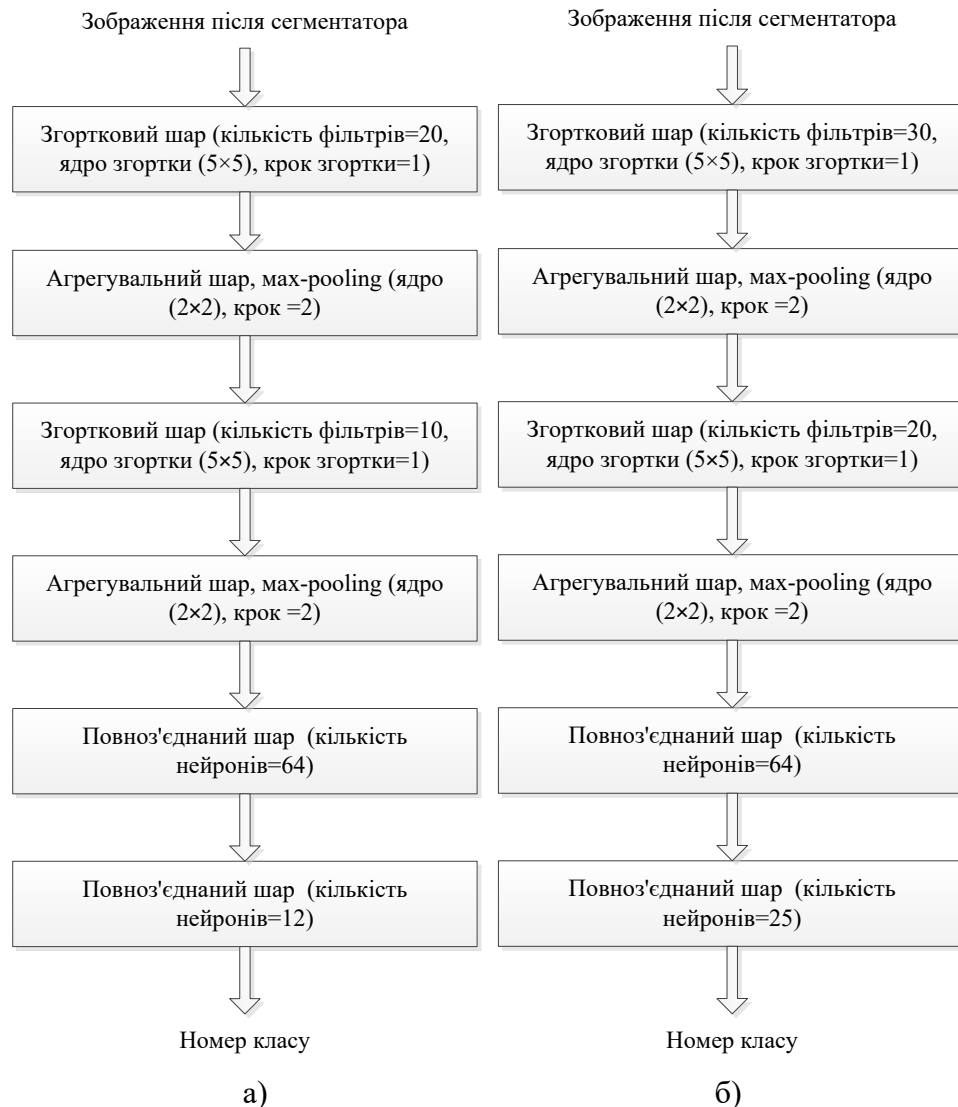


Рисунок 2 – Повна структура класифікаторів:

а) – класифікатора цифр, б) – загального класифікатора та класифікатора слів

Загальна кількість параметрів описаних вище структур нейронних мереж досить велика, наприклад для класифікатора цифр складає 16614, для загального класифікатора 37124. Оптимізації такої кількості параметрів передбачає велику кількість екземплярів для навчання, а тому без програмного розширення навчальної вибірки не обійтись.

**Аугментація, попередня обробка даних та навчання нейронної мережі.** Для розширення навчальної вибірки використовується підхід аугментації даних (data augmentation) – це методика створення додаткових навчальних даних з наявних даних. У цьому випадку до екземпляру з навчальної вибірки застосовуються виконання повороту картини на випадковий з заданого діапазону градус, випадкове масштабування, зсув по всім осям. Відтак, з початкових 380 унікальних екземплярів, після аугментації даних було отримано вибірку з розміром 4000.

Перед передачею в мережу дані повинні бути перетворені в тензори. У даний час дані зберігаються у вигляді файлів JPEG, тому їх потрібно підготувати для передачі в мережу, виконавши наступні кроки: декодувати вміст з формату JPEG у таблиці пікселів; провести зріз порогових значень з метою прибрати шум на зображеннях, змінити масштаб значення пікселів з діапазону  $[0, 255]$  у діапазон  $[0, 1]$ .

У якості метрики для дослідження ефективності запропонованих моделей використовуються стандартні функції втрат categorical\_crossentropy та accuracy – частка правильних відповідей алгоритму.

Після обрання відповідної структури моделі та проведення попередньої обробки даних, проведено навчання загальної нейронної мережі для отримання базового рівня точності розпізнавання, а також проведено навчання нейронних мереж для груп класів для визначеності правильності запропонованого підходу. Останнім було проведено навчання описаних мереж з використанням аугментації даних, результати навчання наведені на рис. 3–5.

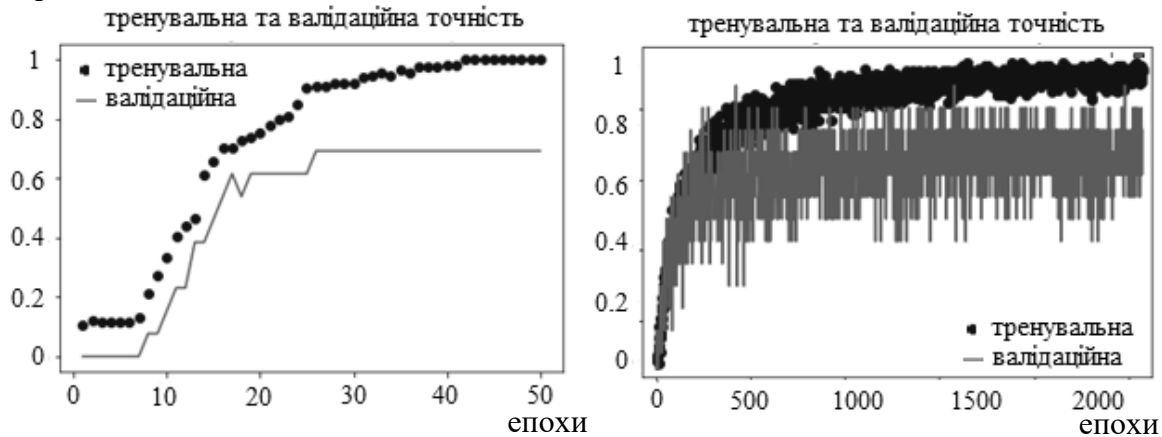


Рисунок 3 – Результати навчання класифікатора цифр без аугментації даних та з аугментацією даних

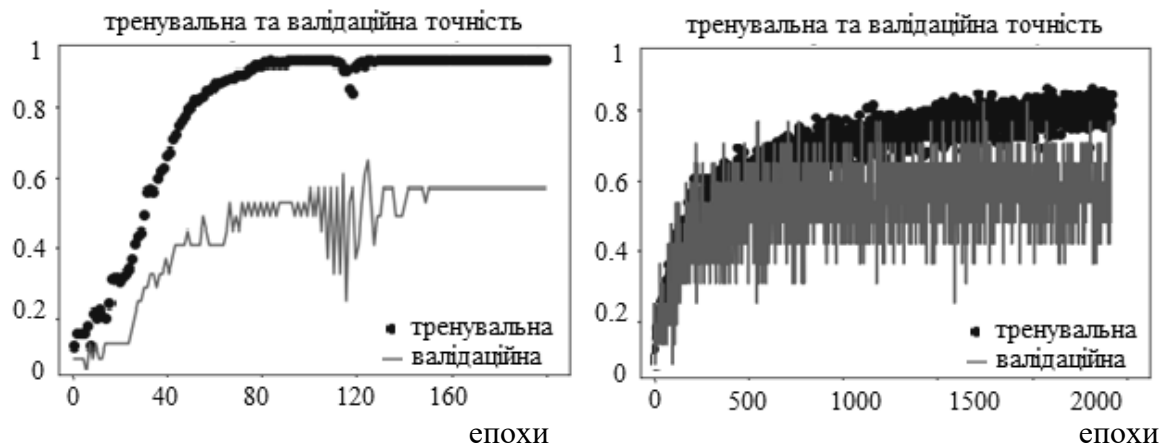


Рисунок 4 – Проміжні дані навчання класифікатора слів без аугментації даних та з аугментацією даних

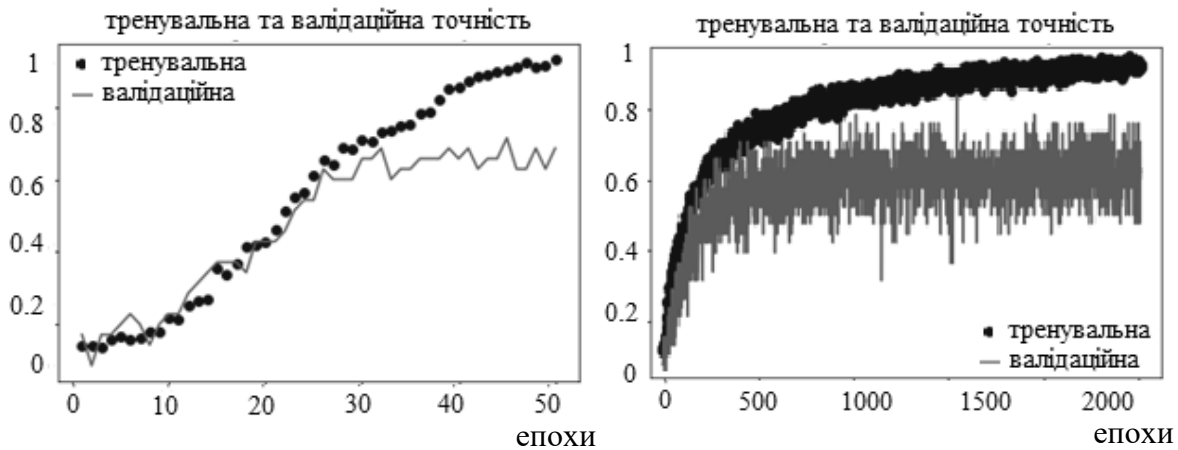


Рисунок 5 – Проміжні дані навчання загального класифікатора без аугментації даних та з аугментацією даних

З результатів проведеного навчання штучних нейронних мереж видно, що для всіх випадків навчання, кількість епох навчання можливо зменшити без втрати валідаційної точності, а відтак зменшити час необхідний для навчання запропонованих мереж.

**Використання автоенкодера для переднавчання класифікаторів.** Автоенкодер (Autoencoder) – це особлива архітектура нейронної мережі, основна задача якої відновлення вхідного сигналу на виході з мережі, шляхом відновлення сигналу з його стиснутої репрезентації. У цьому випадку вхідний сигнал відновлюється з помилками через втрати під час проходження прихованого шару, проте, щоб їх мінімізувати, мережа змушена вчитися відбирати найбільш важливі ознаки в прихованих шарах. Ця особливість лежить у можливості використання автоенкодера для переднавчання. Основною метою роботи автоенкодерів – отримати на вихідному шарі відгук, найбільш близький до вхідного, а відтак структурна характерна особливість автоенкодерів – кількість нейронів у вхідному та у вихідному шарі збігається.

Враховуючи, що структури запропонованих класифікаторів відомі, запропонована наступна структура автоенкодера для переднавчання, що відповідає, двом чередуванням згорткових та агрегувальних шарів, згорткового шару по середині та знову двох чередування згорткових та агрегувальних шарів (рис. 6).

Навчання автоенкодера відбувається на даних отриманих після аугментації, а відтак не обумовлює проблеми їх обмеження, а при доданні до якісно навченого енкодера (саме енкодера – першої половини автоенкодера, що частково відповідає структурі класифікатора) повноз'єднаних шарів дозволяє отримати нейромержу, що відповідає структурі класифікатора з не навченими лише повноз'єднаними шарами. [9]

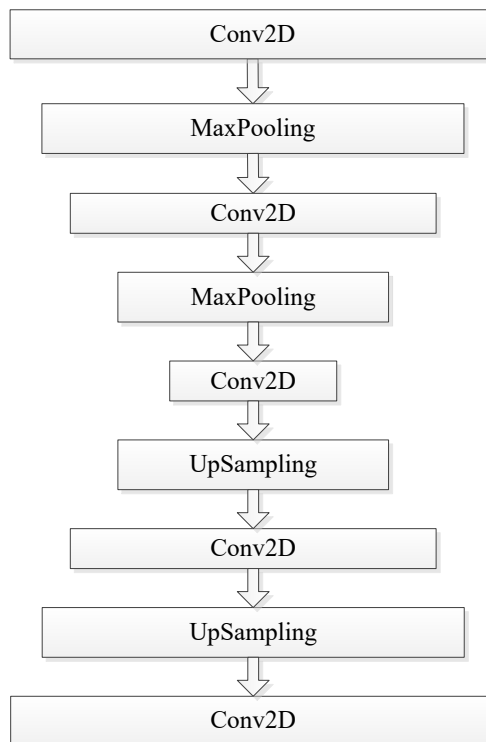


Рисунок 6 – Запропонована структура автоенкодера

Заморозивши ті шари нейронної мережі, які були попередньо навчені при синтезі автоенкодера та провівши донавчання повноз'єднаних шарів було отримано готові нейронні мережеві класифікаторів з наступними параметрами точності (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати навчання нейронних мереж

Параметри	Класифікатор цифр з переднавчанням	Класифікатор слів з переднавчанням	Загальний класифікатор з переднавчанням
Кількість параметрів мережі	16614	37124	37124
Величина навчальної вибірки	114	266	380
Валідаційна точність моделі	0.9411	0.953	0,938

**Висновки.** У роботі розглянуто підходи до розробки складової системи автоматичної обробки документів, а саме класифікатора в умовах обмеженості навчальної вибірки. У якості екземплярів для розроблення, дослідження ефективності та точності запропонованих підходів та систем використовувалась вибірка з 30 атестатів оцінок шкільної дванадцятибальної системи оцінювання, а саме 380 представників.

Показано, що оперативне розроблення класифікаторів такого типу можливе при використанні запропонованих підходів аугментації даних та переднавчання на базі автоенкодера. Отримане початкове порогове значення точності класифікатора в межах 65%, отримана точність у 95 % після застосування запропонованих підходів свідчить, що при розробці аналогічних систем, при обмеженій навчальній вибірці, можливе досягнення високих показників точності. Отримана точність навіть без регуляризації обумовлює отримання класифікаторів з більш високим значенням точності.

У результаті попереднього налізу початкової вибірки було прийнято рішення про розробці двох окремих класифікаторів для двох окремих груп класів. Згідно з отриманих результатів, запропонований підхід дозволив підняти точність загальної класифікації атестатів на декілька відсотків. Звідси слідує, що для визначення унікальних, або непоширених екземплярів має місце навчання принципово окремої, персональної структури/моделі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Франсуа Шолле. Глибоке обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с. (Серия «Библиотека программиста»). ISBN 978-5-4461-0770-4.
2. Соколенко Д. Г., Корнага Я. І. «Система розпізнавання писемних символів за допомогою нейронної мережі», *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки* Том 29 (68) Ч. 2 № 5 2018 с. 56–58.
3. Карпович Артем Валерійович «Використання згорткових нейронних мереж для задачі класифікації текстів», *International scientific journal «Internauka»*. № 14(54), 2018. Technical sciences. с. 69–73.
4. Orhan G. Yalçın Image Classification in 10 Minutes with MNIST Dataset, URL : <https://towardsdatascience.com/image-classification-in-10-minutes-with-mnist-dataset-54c35b77a38d>.
5. Feiyang Chen, Nan Chen, Hanyang Mao, Hanlin Hu Assessing Four Neural Networks on Handwritten Digit Recognition Dataset (MNIST). *Chuangxinban journal of computing*, june 2018, URL : <https://arxiv.org/pdf/1811.08278.pdf>.
6. Yifan Wang, Fenghou Li, Hai Sun, Wenbo Li, Cheng Zhong, Xuelian Wu, Hailei Wang, Ping Wang Improvement of MNIST Image Recognition Based on CNN, 7th Annual International Conference on Geo-Spatial Knowledge and Intelligence IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 428 (2020), URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/428/1/012097/pdf>.
7. Wan Zhu Classification of MNIST Handwritten Digit Database using Neural Network, URL : [http://users.cecs.anu.edu.au/~Tom.Gedeon/conf/ABCs2018/paper/ABCs2018\\_paper\\_117.pdf](http://users.cecs.anu.edu.au/~Tom.Gedeon/conf/ABCs2018/paper/ABCs2018_paper_117.pdf).
8. Korotynskyi, A., Zhuchenko, O. Development of a classifier for the system of automatic document processing with limited sampling, ATIT 2020 - Proceedings: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, 2020, p. 349–352.

9. Korotynskiy A., Zhuchenko O. A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, (2–103), p. 58–67.

## REFERENCES

1. Fransua Sholle. Hlubokoe obuchenye na Python. SPb.: Pyter, 2018. 400 s.: (Seryia «Byblyoteka prohrammysta»). ISBN 978-5-4461-0770-4.
2. Sokolenko D. H., Kornaha Ya. I. «Systema rozpiznavannia pysemnykh symboliv za dopomohoiu neironnoi merezhi», Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya Tekhnichni nauky Tom 29 (68) Ch. 2 # 5 2018 s. 56-58.
3. Karpovych Artem Valeriiovych «Vykorystannia zghortkovykh neironnykh merezh dlia zadachi klasyfikatsii tekstiv», International scientific journal «Internauka» # 14(54), 2018 // Technical sciences s. 69–73.
4. Orhan G. Yalçın Image Classification in 10 Minutes with MNIST Dataset, URL: <https://towardsdatascience.com/image-classification-in-10-minutes-with-mnist-dataset-54c35b77a38d>.
5. Feiyang Chen, Nan Chen, Hanyang Mao, Hanlin Hu Assessing Four Neural Networks on Handwritten Digit Recognition Dataset (MNIST) / *Chuangxinban journal of computing*, june 2018, URL: <https://arxiv.org/pdf/1811.08278.pdf>.
6. Yifan Wang, Fenghou Li, Hai Sun, Wenbo Li, Cheng Zhong, Xuelian Wu, Hailei Wang, Ping Wang Improvement of MNIST Image Recognition Based on CNN, 7th Annual International Conference on Geo-Spatial Knowledge and Intelligence IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 428 (2020), URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/428/1/012097/pdf>.
7. Wan Zhu Classification of MNIST Handwritten Digit Database using Neural Network, URL : [http://users.cecs.anu.edu.au/~Tom.Gedeon/conf/ABCs2018/paper\\_ABCs2018\\_paper\\_117.pdf](http://users.cecs.anu.edu.au/~Tom.Gedeon/conf/ABCs2018/paper_ABCs2018_paper_117.pdf).
8. Korotynskiy, A., Zhuchenko, O. Development of a classifier for the system of automatic document processing with limited sampling, ATIT 2020 – Proceedings: 2020 2nd IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory, 2020, p. 349–352.
9. A. Korotynskiy, O. Zhuchenko A system of automated control for the baking process that minimizes the probability of defects, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, (2-103), p. 58–67.

### Zhuchenko O., Korotynskiy A., Tsapar V., Fedotov V. NERAL NETWORK CLASSIFIER OF AUTOMATION DOCUMENT PROCESSING SYSTEMS

*The work is aimed at solving the applied problem of developing an automatic system for processing electronic documents, namely one of its parts of the classifier. To solve this problem, it is proposed to use approaches to machine learning and artificial intelligence. Solving this problem under normal conditions is not difficult, but this paper considers the case of limited training sample, which is a common case in the development of systems based on the proposed approaches. The study of initial data on the basis of which the model will be taught and the number of classes to be recognized, the number of representatives in each class and the peculiarities of their presentation. The paper presents approaches, the application of which allows to increase the accuracy of systems of this type, in the conditions of limited initial initial sampling. Among the proposed approaches, the principle of minimizing the parameters in the formation of the architecture of the artificial neural network, data augmentation, pre-training of the artificial neural network by using an autoencoder. The obtained accuracy of 94–95 %, after the application of the proposed approaches in contrast to 70 % of the original, confirms the possibility of rapid development of similar classifiers of this type, with limited sampling and time minimization, achieving high accuracy.*

**Keywords:** neural networks, argumentation, autoencoder, pre-learning, classifier.

© Жученко О. А., Коротинський А. П., Цапар В. С., Федотов В. В.

Статтю прийнято  
до редакції 21.11.21

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБ'ЄКТА ЗА ВЕКТОРОМ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

**Рожков С. О.**, д.т.н., професор, завідувач кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: rozhkov\_ser@meta.ua;

**Кондрашов К. В.**, PhD, електромеханік 1-го розряду, e-mail: kondrashov\_82k.v@ukr.net;

**Тимофєєв К. В.**, к.т.н., доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtimofeev2013@gmail.com;

**Бутаков І. Б.**, аспірант кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: bib7677@gmail.com;

**Старов М. В.**, аспірант кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: mykola-starov@ukr.net.

У статті розглядається перспективний метод діагностики та автоматичного контролю за вектором параметрів для вирішення проблеми підвищення ефективності експлуатації судової аварійно-попереджувальної системи (АПС). У математичній моделі системи діагностування стану судових систем реалізовано алгоритм, який дозволяє забезпечити автоматичний моніторинг та прогнозування стану судна та його систем. Реалізація в системі управління додаткового зворотного зв'язку у вигляді регулятора дозволяє не тільки накопичувати інформацію про прийняті рішення, отримані результати та сигнали про несправності, але й забезпечує сумісність результатів на основі діагностичної інформації. Використання системи підтримки прийняття рішень зі зворотним зв'язком (СППР, англ. DSS – decision support system) у завданнях автоматичного контролю, як інтелектуальної системи із спостерігачем за вектором стану, дозволяє отримувати інформацію про стан судових систем у режимі реального часу та прогнозувати їхній майбутній стан.

**Ключові слова:** аварійно-попереджувальна сигналізація, діагностування, інформаційна система, надійність, експлуатація.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2021.2.25.092-100**

**Вступ.** На всіх сучасних суднах, незалежно від типу та конструкції, використовують системи діагностування обладнання – систему аварійно-попереджувальної сигналізації (АПС) [1, 2]. Основним завданням таких судових АПС є безперервне діагностування судових систем у режимі реального часу. До числа найбільш ефективних АПС можна віднести наступні системи: NORCONTROL 8810; UMS 2100 датської фірми «LINGSO MARINE»; AUTO CHIEF-700 німецької фірми «KONGSBERG»; MANAGER 301M.

**Актуальність дослідження.** Загальний процес роботи АПС можна описати наступним чином:

- отримання інформації про стан об'єкту діагностування і перетворення її для подальшої обробки;
- виявлення в інформації, що надходить, ознак відхилення параметрів і формування попереджувального або аварійного сигналу про настання цієї події.

Поняття стану системи є основним вихідним поняттям [3], тому що стан системи відокремлює майбутнє від минулого і містить всю інформацію, яка необхідна для визначення реакції об'єкта на довільний вхідний сигнал. Основною властивістю стану є те, що майбутні значення його не залежать від характеру досягнення системою її поточного

стану. Таким чином, можна сформулювати властивості, якими повинна володіти система, поведінка, якої відповідає поняттю стану.

Далі будемо використовувати наступні визначення (1):  $\mathbf{x}$  – вектор станів,  $\mathbf{u}$  – вектор управління,  $\mathbf{g}$  – вектор збурення,

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \mathbf{x}; \quad \dim \mathbf{x} = n; \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = \mathbf{u}; \quad \dim \mathbf{u} = m; \quad \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_k \end{bmatrix} = \mathbf{g} \quad \dim \mathbf{g} = k. \quad (1)$$

Для можливості обліку конструктивних особливостей об'єкта введемо множину параметрів у вигляді матриці  $A$ . Також введемо поняття динамічного об'єкта  $W$ , який набирає вигляду  $W = W(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{g}, A)$ . Якщо припустити, що  $A = const$ , а також незалежність поведінки системи від зовнішніх впливів, то можна досліджувати залежність векторів від часу. Для цього зафіксуємо точку режиму при  $\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*, \mathbf{g}^*$ .

З огляду на умови збереження стану об'єкту діагностування (ОД) без урахування управління та збурення, для вихідної величини (1) отримуємо:

$$\mathbf{x} \in \varepsilon(\mathbf{x}^*) \rightarrow \mathbf{y} \approx \mathbf{x}^* + \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}} \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^2} \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^3} \frac{d^3 \mathbf{x}}{dt^3} + \dots + \mathbf{R} = \mathbf{0}. \quad (2)$$

Для зміни контрольованих параметрів об'єкта діагностування в межах допустимих режимів роботи без управлінь та збурень отримуємо різні моделі, формулюючи їх відносно старшої похідної (табл. 1).

Таблиця 1 – Моделі допустимих режимів роботи ОД

Порядок моделі	Рівняння моделі
1	$\frac{d\mathbf{x}}{dt} + \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}} \right)^{-1} \mathbf{x} = \mathbf{0}$
2	$\frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^2} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}} \right) \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^2} \right)^{-1} \mathbf{x} = \mathbf{0}$
3	$\frac{d^3 \mathbf{x}}{dt^3} + \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^3} \right)^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^2} \right) \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} + \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^3} \right)^{-1} \left( \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}} \right) \frac{d\mathbf{x}}{dt} + \left( \frac{1}{6} \frac{\partial^3 \mathbf{y}}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{x}^*}^3} \right)^{-1} \mathbf{x} = \mathbf{0}$

Позначивши матриці в рівняннях моделі як  $A_0, A_1, A_2$ , отримаємо стандартну форму моделі динаміки системи в просторі станів. Рівняння зміни стану ОД у межах допустимих значень лінійної системи третього порядку має вигляд:

$$\ddot{\mathbf{x}} + A_2 \dot{\mathbf{x}} + A_1 \dot{\mathbf{x}} + A_0 \mathbf{x} = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Вплив управлінь та збурень на ОД можна описувати за тим же методом, але зазвичай є достатні моделі з правою частиною нульового порядку [3, 4]:

$$\ddot{\mathbf{x}} + A_2 \dot{\mathbf{x}} + A_1 \dot{\mathbf{x}} + A_0 \mathbf{x} = \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{Q}\mathbf{g}. \quad (4)$$

Для опису моделі динамічної системи ОД у просторі станів застосуємо формулу Коші:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{Q}\mathbf{g}. \quad (5)$$

Виходячи з формули (5), можна стверджувати про можливість моделювання динамічного об'єкта. У найпростішому випадку спостерігаються впливи управління та збурення при відомих матрицях моделі ОД. Об'єднавши рівняння моделі та об'єкта, отримаємо систему:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{Q}\mathbf{g} \\ \dot{\mathbf{x}}_m &= \mathbf{A}_m\mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m\mathbf{u}_m + \mathbf{Q}_m\mathbf{g}_m \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Припущення ідентичності моделі об'єкта та вимірюваним управлінням і збуренням для оцінки відхилення моделі від об'єкта дозволяє реалізувати модель  $W_m$  для об'єкта  $W$  у вигляді простої схеми, яку показано на рис. 1. Отримана модель  $W_m$  може «рухатися» у темпі об'єкта  $W$  або випереджати його.

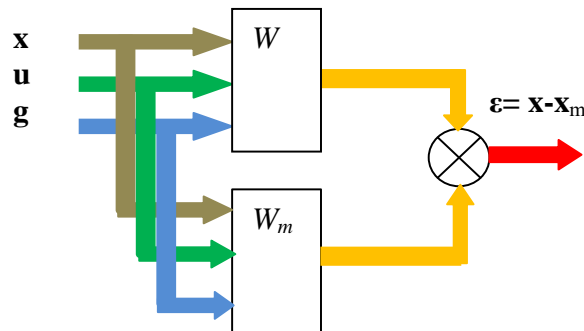


Рисунок 1 – Система формування оцінки відхилення системи та її моделі

Під помилкою будемо розуміти різницю вектора стану об'єкта діагностування та його моделі:

$$\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{A}_m\mathbf{x}_m + \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{B}_m\mathbf{u}_m + \mathbf{Q}\mathbf{g} - \mathbf{Q}_m\mathbf{g}_m. \quad (7)$$

Для ідентичної моделі і вимірюваних управліннях та збуреннях отримуємо рівняння у відхиленнях

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_m; \mathbf{B} = \mathbf{B}_m; \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_m \rightarrow \dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_m) \rightarrow \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (8)$$

При рівних початкових умовах модель та система знаходяться в рівних станах  $\boldsymbol{\varepsilon} = 0$ . При різних початкових умовах та за умови асимптотичної стійкості системи (8), помилка оцінки вектора стану призведе до нуля тільки через певний час. Усунути такий недолік в оцінці вектора станів можна введенням пропорційного регулятора в управління моделлю з матрицею передачі  $W_c$ . Таким чином, отримуємо систему рівнянь (9):

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = (\mathbf{A} + \mathbf{W}_c)\boldsymbol{\varepsilon} \rightarrow \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{G}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (9)$$

Алгоритм усунення помилки оцінювання стану (9) зображено на рис. 2. Реалізація додаткового контуру регулювання за помилкою дозволяє достатньо швидко усунути помилку, яка позначається відмінностями початкових умов. У такому випадку модель буде «наздоганяти» об'єкт, коректуючи своє управління на помилку  $\boldsymbol{\varepsilon}$ .

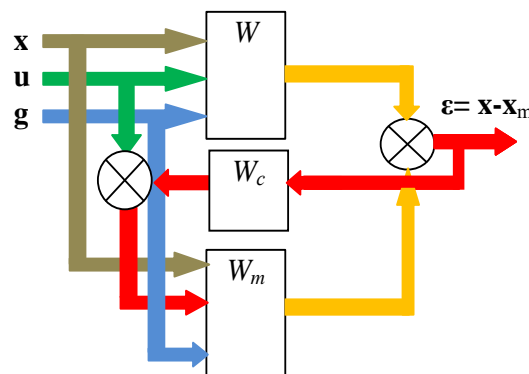


Рисунок 2 – Алгоритм усунення помилки початкових умов

Динамічні характеристики системи (9) визначаються власними числами матриці  $G$ . Оскільки матриця  $W_c$  обирається довільно, то за вибором  $W_c$  можемо відібрати власні числа матриці  $G$ , які забезпечать необхідну асимптотичну збіжність помилки оцінювання до нуля.

Такий асимптотичний спостерігач стану дозволяє виключити тільки помилку, яка пов'язана з початковими умовами або неконтрольованими збуреннями. Проте реалізація такого методу досить проста як в аналоговому, так і в цифровому алгоритмі. Наприклад, реалізація методом Рунге-Кутти першого порядку має вигляд для рівняння першого порядку (10):

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t}; \quad \dot{x} = Ax \quad \rightarrow \quad \frac{x(t+\Delta t) - x(t)}{\Delta t} = Ax(t). \quad (10)$$

Таким чином, для пари «об'єкт-модель» отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} x(t+\Delta t) &= x(t) + Ax(t)\Delta t \\ x_m(t+\Delta t) &= x_m(t) + Ax_m(t)\Delta t \end{aligned} \right\} \rightarrow \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= x_n \\ x(t+\Delta t) &= x_{n+1} \end{aligned} \right\} \rightarrow \dot{\varepsilon}_{n+1} = \varepsilon_n + A\varepsilon_n\Delta t$$

Для того, щоб отримати більш високу ступінь збіжності, введемо додатковий зв'язок:

$$\dot{\varepsilon}_{n+1} = \varepsilon_n + (A + W_c)\varepsilon_n\Delta t. \quad (12)$$

Для ідентифікації моделей динамічних об'єктів [3–5] повторимо підхід, який використовується при побудові спостерігача. Припустимо, що в системі рівнянь у просторі станів матриця об'єкта відрізняється від матриці моделі. У найпростішому випадку одновимірної системи (суднової системи 1–3 рівня складності) маємо:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= ax(t) \\ \dot{x}_m(t) &= a_m x_m(t) \end{aligned} \right\} \rightarrow \dot{x}(t) - \dot{x}_m(t) = ax(t) - a_m x_m(t). \quad (13)$$

Прийmemo  $\Delta a = a - a_m$ ,  $\Delta x = x - x_m$ , таким чином отримаємо (13) у вигляді:

$$\Delta \dot{x} = a_m \Delta x + \Delta a x. \quad (14)$$

З рівняння (14) можна виміряти  $\Delta x$ ,  $x$ , тому при оцінці матриці моделі  $\Delta a$  можемо визначити величину помилки

$$\Delta a = \frac{\Delta \dot{x} - a_m \Delta x}{x}. \quad (15)$$

Для багатовимірних систем, таких, наприклад, як суднова система діагностування, замість простого розрахунку (15) у просторі станів використовуються матричні рівняння [4–7, 9]. У структуру системи додається додатковий оптимальний регулятор  $W_i$ , який забезпечує підстроювання моделі під об'єкт (рис. 3). Таким чином, отримуємо структуру з двома регуляторами: асимптотичним спостерігачем  $W_c$  та ідентифікатором  $W_i$ , де регулятор  $W_i$  буде зменшувати помилку  $\varepsilon$ , наближуючи матрицю моделі або  $\alpha_m$  – вектор параметрів моделі. При прагненні вектора помилки  $\varepsilon$  до нуля, вектор параметрів моделі  $\alpha_m$  буде прагнути до вектора параметрів об'єкта  $\alpha$ .

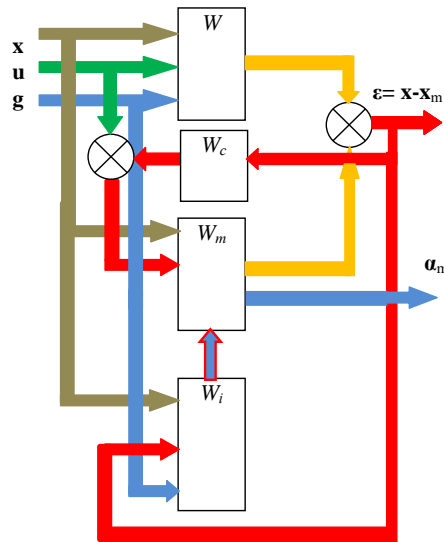


Рисунок 3 – Алгоритм відновлення вектора параметрів

Введемо вирішальне правило  $L(\Delta \mathbf{a})$  для визначення межі нормального стану об'єкта діагностування  $\Omega$ :

$$\mathbf{a} \in \Omega \text{ if } \begin{cases} \Delta \mathbf{a}_1 \in \Omega_1 \subseteq \Omega \\ \Delta \mathbf{a}_2 \in \Omega_2 \subseteq \Omega \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{a}_n \in \Omega_n \subseteq \Omega \end{cases} \quad (16)$$

Для кожного параметра  $\alpha_{ij}$  моделі об'єкта будемо будувати алгоритм аналізу вектора параметрів. При визначенні всіх допустимих меж параметрів визначимо вирішальне правило:

$$\begin{cases} \alpha_{ij} \in \Omega \text{ if } |\alpha_{ij} - \alpha_{ij}^*| < \varepsilon \\ \alpha_{ij} \notin \Omega \text{ if } |\alpha_{ij} - \alpha_{ij}^*| \geq \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

Таким чином, отримуємо логічну функцію  $L(\mathbf{a})$ , яка формує судження про стан об'єкта. Таким чином, загальна система діагностики та автоматичного контролю стану об'єкта прийме вигляд, який зображено на рис. 4.

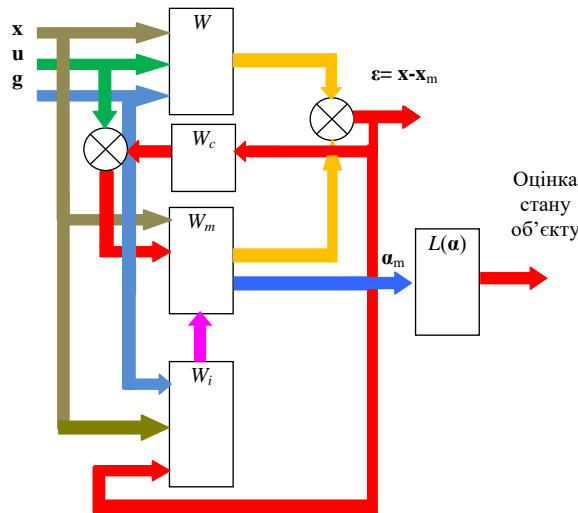


Рисунок 4 – Система автоматичного контролю стану об'єкта за вектором параметрів системи

Для обробки даних про несправності об'єктів діагностування, одержуваних від спостерігача, необхідно створення такої системи підтримки прийняття рішень, яка дозволить постачати оператору ненадмірну інформацією про методи та алгоритми усунення проблеми, що виникла.

Рішення задачі створення такої системи контролю та діагностики стану об'єкта за вектором станів, а також варіанти вирішення виниклих проблем, представлено на рис. 5.

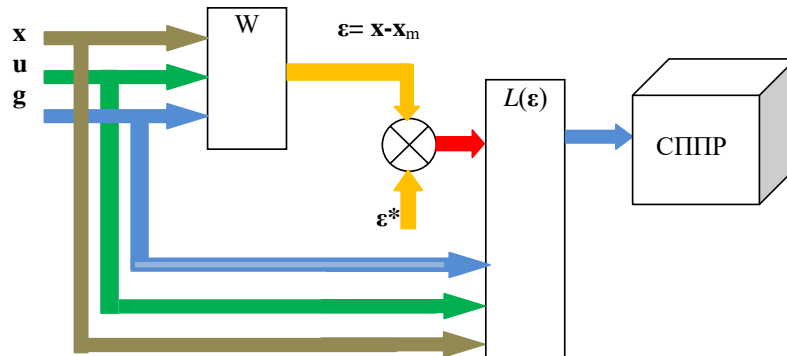


Рисунок 5 – Структура системи автоматичного контролю та діагностики за вектором стану

Визначимо оцінку стану у вигляді логічного висловлювання, яке визначає зв'язок компонент вектора станів з множиною оцінок стану об'єкта:

$$\begin{cases} \alpha_i = 1 & \text{if } |x_i - x^*_i| < \varepsilon; \\ \alpha_i = 0 & \text{if } |x_i - x^*_i| \geq \varepsilon; \end{cases} \quad i = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Визначивши алфавіт станів об'єкта, отримуємо загальний алгоритм прийняття рішень:

$$\omega = \begin{cases} \omega_1 & \text{if } \bigcup_{i=1}^n a_i \\ \omega_1 & \text{if } \bigcup_{i=2}^n a_i \cup \bar{a}_1 \\ \vdots \\ \omega_1 & \text{if } \bigcup_{i=1}^n \bar{a}_i \end{cases}. \quad (19)$$

Таким чином, отримано простий алгоритм системи автоматичної діагностики стану об'єкта. Якщо додати аналіз управлінь та збурень, то з'являється можливість оцінювати стан об'єкта в широкому спектрі режимів і навантажень. Але недоліком такого підходу є відсутність зв'язку вирішального правила (19) з вектором параметрів об'єкта.

Для прогнозу стану об'єкта необхідно оцінити швидкість зміни  $\alpha$ -вектора параметрів об'єкта, що часто важко виконати за оцінкою вектора станів.

Для вектора параметрів можливо оцінити динаміку рівняння в просторі станів параметрів з матрицею, при цьому виділяється область  $S$ , належність до якої вектора станів визначає позитивний прогноз працездатності системи:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Q\alpha \quad \rightarrow \quad \omega \in \begin{cases} \Omega_1 & \text{if } \alpha \in S \\ \Omega_1 & \text{if } \alpha \notin S \end{cases}. \quad (20)$$

Таке рівняння може бути ідентифіковано методами, які були описані раніше та може виступати як модель прогнозу.

Аналіз стану об'єкта за швидкістю зміни параметрів дозволяє побудувати систему прогнозу відмов, яку показано на рис. 6.

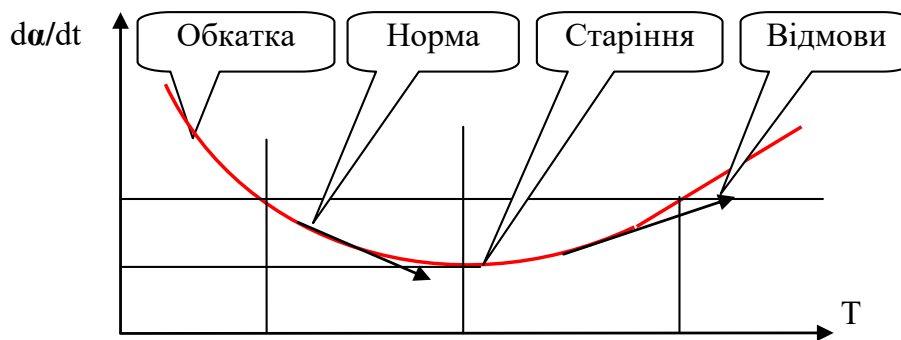


Рисунок 6 – Швидкість зміни вектора параметрів та прогноз відмов

Спостерігаючи за вектором параметрів моделі, використовуємо вектор стану  $\mathbf{x}$ , вектор управління  $\mathbf{u}$ , вектор збурення  $\mathbf{g}$  та вектор параметрів  $\mathbf{a}$ . При такому спостереженні стан системи оцінюється щодо допустимих значень. Таким чином, стан системи відноситься до множини нормальних станів  $W^*$ , якщо всі вектора укладаються в задані рамки:

$$W \in W^* \quad \text{if} \quad \begin{cases} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| \leq \varepsilon_x \\ \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^*\| \leq \varepsilon_u \\ \|\mathbf{g} - \mathbf{g}^*\| \leq \varepsilon_g \\ \|\mathbf{a} - \mathbf{a}^*\| \leq \varepsilon_a \end{cases} \quad (21)$$

Вираз (21) визначає вимоги відповідності вектора параметрів:

$$W \in W^* \quad \text{if} \quad \begin{cases} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| \leq \varepsilon_x \\ \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^*\| \leq \varepsilon_u \\ \|\mathbf{g} - \mathbf{g}^*\| \leq \varepsilon_g \\ \|\mathbf{a} - \mathbf{a}^*\| \leq \varepsilon_a \end{cases} \Leftrightarrow \|\mathbf{a} - \mathbf{a}^*\|_{\substack{\|\mathbf{g} - \mathbf{g}^*\| \leq \varepsilon_g \\ \|\mathbf{u} - \mathbf{u}^*\| \leq \varepsilon_u}} \leq \varepsilon_a \quad (22)$$

Якщо при допустимих управліннях та збуреннях вектор параметрів у нормі, то в такому випадку і вся система буде в нормальному стані.

**Основні результати та висновки.** Метод діагностики та автоматичного контролю за вектором параметрів є перспективним, тому що знання вектора параметрів об'єкта дозволяє визначити стан об'єкта, и таким чином контролювати стан об'єкта.

Математична модель системи діагностування стану суднових систем у задачах автоматичного контролю у вигляді спостерігача за вектором параметрів систем дозволяє очікувати використання інтелектуальних систем, які забезпечать автоматичний моніторинг, прогнозування стану судна та його систем, а також формування рекомендації для пошуку та усуненню несправностей обладнання.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. KONSBERG. Standard K-Chief 600 Alarm and Monitoring System / 354760 / Rev.D March 2013 © Kongsberg Maritime AS.
2. KONSBERG. Kongsberg K-Chief 500/600 Marine Automation System Installation Manual /311956 / F March 2013 © Kongsberg Maritime AS.
3. Згуровский, М. З. Системный анализ: проблемы, методология приложения [Текст] / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. – К.: Наукова думка, 2005. – 742.
4. Акимов В. А. Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. Попов. М.: Деловой экспресс, 2002. 367 с.
5. Портнягин Н. Н., Пюкке Г. А. Теория, методы и эксперименты решения задач диагностики судовых электрических средств автоматизации. СПб.: Судостроение, 2004. 162 с.
6. Тихонов А. Н. Дифференциальные уравнения. А. Н. Тихонов, Васильева А. Б., Свешников А. Г. М.: Физматлит. 2002. 232 с.
7. Вычужанин В. В. Информатизация дистанционного диагностирования состояния сложных технических систем / В. В. Вычужанин, С. Н. Коновалов. *Информатика и математические методы в моделировании*, 2016. Том 6, №1. С. 303–311.
8. Sergiy Rozhkov, Kostyantyn Kondrashov, Oksana Tereshchenkova, Maryna Falenkova. Informational expert system for minimizing the time in searching of ship electrical equipment failures. CEUR-WS.org/Vol-2845. *Information technology and interactions (IT&I 2020)*, p. 418–426.
9. Sergiy Rozhkov, Kostyantyn Kondrashov, Oksana Tereshchenkova, Maryna Falenkova. Informational Expert System for Minimizing the Time in Searching of Ship Electrical Equipment Failures Proceedings of the 7th International Conference "Information Technology and Interactions" (IT&I-2020). Workshops Proceedings Kyiv, Ukraine, December 02-03, 2020. P.170–180. [http://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper\\_17.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_17.pdf).
10. Kashtalyan P. V., Rozhkov S. O. Mathematical and information provisions of bridge team training control systems // *Electronics and Control Systems*, 2019. No2(06). P.61–69. (ISSN 1990-5548) doi: 10.18372/1990-5548.60.13816.

## REFERENCES

1. KONSBERG. Standard K-Chief 600 Alarm and Monitoring System / 354760 / Rev.D March 2013 © Kongsberg Maritime AS.
2. KONSBERG. Kongsberg K-Chief 500/600 Marine Automation System Installation Manual /311956 / F March 2013 © Kongsberg Maritime AS.
3. Zgurovskiy, M. Z. Sistemniy analiz: problemih, metodologiya prilozheniya / M. Z. Zgurovskiy, N. D. Pankratova. K.: Naukova dumka, 2005. – 742.
4. Akimov V. A. Nadezhnostj tekhnicheskikh sistem i tekhnogennihy risk / V. A. Akimov, V. L. Lapin, V. M. Popov. M.: Delovoy ehkspress, 2002. – 367 s.
5. Portnyagin N. N., Pyukke G. A. Teoriya, metodih i ehksperimentih resheniya zadach diagnostiki sudovihkh ehlektricheskikh sredstv avtomatizacii. – SPb.: Sudostroenie, 2004. 162 s.
6. Tikhonov A. N. Differencialjnihe uravneniya 4-e izd. A.N. Tikhonov, Vasiljeva A. B. Sveshnikov A. G. M.: Fizmatlit. 2002. 232 s.
7. Vihchuzhanin V. V. Informatizaciya distancionnogo diagnostirovaniya sostoyaniya slozhnihkh tekhnicheskikh sistem [Tekst] / V. V. Vihchuzhanin, S. N. Konovalov // *Informatika i matematicheskie metodih v modelirovanii*, 2016. – Том 6, №1. – S. 303–311.
8. Sergiy Rozhkov, Kostyantyn Kondrashov, Oksana Tereshchenkova, Maryna Falenkova. Informational expert system for minimizing the time in searching of ship electrical equipment failures. CEUR-WS.org/Vol-2845 – *Information technology and interactions (IT&I 2020)*, p. 418–426.

9. Sergiy Rozhkov, Kostyantyn Kondrashov, Oksana Tereshchenkova, Maryna Falenkova. Informational Expert System for Minimizing the Time in Searching of Ship Electrical Equipment Failures Proceedings of the 7th International Conference "Information Technology and Interactions" (IT&I-2020). Workshops Proceedings Kyiv, Ukraine, December 02-03, 2020. P.170-180. [http://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper\\_17.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-2845/Paper_17.pdf).

10. Kashtalyan P. V., Rozhkov S. O. Mathematical and information provisions of bridge team training control systems // Electronics and Control Systems, 2019. No2(06). P. 61–69. (ISSN 1990-5548) doi: 10.18372/1990-5548.60.13816.

**Рожков С. А., Кондрашов К. В., Тимофеев К. В., Бутаков И. Б., Старов М. В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО ВЕКТОРУ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ**

*В статье рассматривается перспективный метод диагностики и автоматического контроля по вектору параметров для решения проблемы повышения эффективности эксплуатации судовой аварийно-предупредительной системы (АПС). В математической модели системы диагностирования состояния судовых систем реализован алгоритм, который позволяет обеспечить автоматический мониторинг и прогнозирование состояния судна и его систем. Реализация в системе управления дополнительной обратной связи в виде регулятора позволяет не только накапливать информацию о принятых решениях, полученных результатах и сигналах о неисправностях, но и обеспечивает сопоставимость результатов на основе диагностической информации. Использование системы поддержки принятия решений с обратной связью (СППР, англ. DSS – decision support system) в задачах автоматического контроля, как интеллектуальной системы с наблюдателем по вектору состояния, позволяет получать информацию о состоянии судовых систем в режиме реального времени и прогнозировать их будущее состояние.*

**Ключевые слова:** аварийно-предупредительная сигнализация, диагностирование, информационная система, надежность, эксплуатация.

**Rozhkov S. A., Kondrashov K. V., Timofeev K. V., Butakov I. B., Starov M. V. MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC OBJECT STATE CONTROL BY THE VECTOR OF SYSTEM PARAMETERS**

*The article considers a promising method of diagnostics and automatic control by the vector of parameters to solve the problem of increasing the efficiency of operation of the ship's emergency warning system (APS). In the mathematical model of the system for diagnosing the state of ship systems, an algorithm is implemented that allows for automatic monitoring and forecasting of the state of the ship and its systems.*

*The implementation of additional feedback in the form of a controller in the control system algorithm allows not only to accumulate information about the decisions made, the results obtained, and fault signals, but also ensures the comparability of the results based on diagnostic information.*

*Such an implementation of the asymptotic state observer makes it possible to quickly eliminate the error associated with the initial conditions or uncontrolled perturbations. The implementation of this method is quite simple in both analog and digital algorithms. The article shows the implementation of the algorithm by the Runge-Kutta method of the first order. For the asymptotic convergence of the estimation error to zero, the observer matrix is chosen arbitrarily.*

*The article shows that in order to predict the state of an object, it is necessary to estimate the rate of change of the vector of object parameters, but this is quite difficult to do by estimating the state vector.*

*The paper also shows that it is possible to evaluate the dynamics by an equation in the state space of parameters with a matrix, however, in this case, it is necessary to single out the area in which the state vector determines a positive forecast of the system's performance.*

*The use of a decision support system with feedback (DSS, eng. DSS - decision support system) in automatic control tasks, as an intelligent system with an observer along the state vector, allows you to receive information about the state of ship systems in real time and predict their future state.*

**Keywords:** alarm system, diagnostics, information system, reliability, operation. *Key words: alarm system, diagnostics, information system, reliability, operation.*

© Рожков С. О., Кондрашов К. В., Тимофеев К. В., Бутаков И. Б., Старов М. В.

Статтю прийнято  
до редакції 02.11.21

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті з результатами власних оригінальних досліджень, що мають наукову і практичну значущість і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

*Обсяг статей* – до 10 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

*Оформлення статті*. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

*Код УДК* – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

*Назва* – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

*Інформація про автора(ів)*: прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, повна назва установи або громадської організації, посада, держава, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

*Текст* надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210\*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2 см;

палітурка – 0 см;

колонтитули – 1,3 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки без нумерації.

*Формули* повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули (якщо такий є) теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити):

– Звичайний 12 пт.

– Крупний індекс 7 пт.

– Дрібний індекс 5 пт.

– Крупний символ 18 пт.

– Дрібний символ 12 пт.

*Таблиці* набираються у Microsoft Word.

*Рисунки* повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл і роздруковку статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

*Структура статті*: вступ (постановка задачі або проблеми); рішення задачі (мета, задачі, об'єкти, предмети, методи дослідження); основні результати та висновки з

перспективами; список використаних літературних джерел. Основні розділи можуть мати назви, відмінні від приведених вище найменувань.

*Список використаної літератури* подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ 7.1:2015. У списку повинно бути не менше 10 джерел, у списку посилань неприпустимо використання ДСТУ та загальнонаціональних стандартів, відсоткове співвідношення самоцитуювання – не більше 30 % (тобто якщо Ви використали 10 посилань, з них може бути не більше 3 на роботи автора).

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (*References*), для його оформлення використовувати APA-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://translit.kh.ua> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

*Структуровані анотації* українською, російською та англійською мовами обсягом від 1800 знаків без пробілів надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на двох інших мовах – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

*Документи, що подаються до редакції.*

Для публікації автор повинен надати до відділу технічної інформації ХДМА:

- Комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо;
- рукопис статті (на паперовому носії), підписаний автором(ами) – 2 примірники.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською, англійською і російською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів трьома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Редакційна колегія залишає за собою право як не публікувати роботи у разі їх відхилення, так і приймати рішення щодо їх відповідності напрямам журналу. Рукописи авторам не повертаються.

**ЗМІСТ**

***МОРСЬКИЙ ТА РІЧКОВИЙ ТРАНСПОРТ***

**Mgeladze M., Surmanidze G.** 6  
 THE CHALLENGES AND IMPACT OF COVID-19 ON SEAFARER'S RIGHTS AND FREEDOMS

**Клевцов К. М., Сапронов О. О., Акімов О. В., Васильченко Г. Ю.** 18  
 РОЗВИТОК ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНО-ЛОГІСТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

***ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ***

**Букетов А. В., Кулініч В. Г., Кулініч В. В., Сметанкін С. О., Палагній В. І.** 29  
 ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ТЕПЛОСТІЙКИХ АНТИКОРОЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ РЕМОНТУ І ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

**Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Гевко І. Б., Хорошун Р. В.** 38  
 МОДЕЛЬ РУХУ АВТОМОБІЛЯ ПО КРИВОЛІНІЙНІЙ ТРАСІ

**Сапронов О. О., Шаранов В. Д., Воробйов П. О., Сапронова А. В., Настасенко В. О., Палагній В. І.** 48  
 НОВІТНІ ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ АНТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ ПОВЕРХОНЬ СУДНОВИХ ВАНТАЖНИХ ТА ПАЛУБНИХ МЕХАНІЗМІВ

**Шарко О. В., Клевцов К. М., Акімов О. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. О.** 59  
 ІДЕНТИФІКАЦІЯ СТАНУ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ, МЕХАНІЧНИХ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТУРБОНАГНІТАЧАХ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***

**Голощанов С. С.** 75  
 ЭСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СЛОЖНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**Жученко О. А., Коротинський А. П., Цапар В. С., Федотов В. В.** 83  
 НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ КЛАСИФІКАТОР АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДОКУМЕНТІВ

**Рожков С. О., Кондрашов К. В., Тимофєєв К. В., Бутаков І. Б., Старов М. В.** 92  
 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ СТАНУ ОБ'ЄКТА ЗА ВЕКТОРОМ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ

**ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ** 101

## CONTENTS

### *SEA AND RIVER TRANSPORT*

**Mgeladze M., Surmanidze G.** 6  
THE CHALLENGES AND IMPACT OF COVID-19 ON SEAFARER'S RIGHTS AND FREEDOMS

**Klevtsov K., Sapronov O. O., Akimov O. V., Vasylchenko H. Yu.** 18  
DEVELOPMENT OF GREENING OF TRANSPORT AND LOGISTICS ACTIVITIES

### *ENGINEERING IN THE TRANSPORT INDUSTRY*

**Buketov A. V., Kulinich V. G., Kulinich V. V., Smetankin S. O., Palagnii V. I.** 29  
IMPLEMENTATION OF PROTECTIVE HEAT-RESISTANT ANTI-CORROSIVE COATINGS FOR REPAIR AND INCREASING OF VEHICLE PARTS' RELIABILITY

**Rogatynskiy R., Lyashuk O., Hevko I., Horoshyn R.** 38  
CAR MOTION MODEL ON A CURVED LINE

**Sapronov O. O., Sharanov V. D., Vorobiov P. O., Sapronova A. V., Nastasenko V. O., Palagniy V. I.** 48  
THE NEWEST POLYMER MATERIALS FOR ANTI-CORROSION PROTECTION OF THE SURFACES OF SHIP CARGO AND DECK MECHANISMS

**Sharko O. V., Klevtsov K. M., Akimov O. V., Stepanchikov D. M., Sharko A. O.** 59  
IDENTIFICATION OF THE STATE OF THE REMAINING RESOURCE, MECHANICAL AND THERMODYNAMIC PROCESSES IN TURBOCHARGER USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

### *AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES*

**Goloschapov S. S.** 75  
EXPRESS METHOD OF EVALUATION OF SPEED OF COMPLEX MEASURING SYSTEMS

**Zhuchenko O., Korotynskiy A., Tsapar V., Fedotov V.** 83  
GENERAL NETWORK CLASSIFIER OF AUTOMATION DOCUMENT PROCESSING SYSTEMS

**Rozhkov S. A., Kondrashov K. V., Timofeev K. V., Butakov I. B., Starov M. V.** 92  
MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM OF AUTOMATIC OBJECT STATE CONTROL BY THE VECTOR OF SYSTEM PARAMETERS

**APPLICATION REQUIREMENTS** 101

Для нотаток

Науковий журнал

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

№ 2 (25), 2021

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*  
Технічний редактор *О. Ю. Клементьєва*  
Коректор *Н. Н. Грем*  
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*  
Друк, фальцювальні-палітурні роботи *В. Г. Удов*

Підписано до друку 27.01.2022. Формат 60×80/16.  
Папір офсетний.  
Ум. др. арк. 6,63. Наклад 100 прим.

Видавець і виготовлювач ХДМА  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012  
73000, м. Херсон, просп. Ушакова, 20