

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 9 (295)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 9 (295) 2025

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ЗАСНОВАНО У 1996 РОЦІ

ВИХІД З ДРУКУ - ДВНАДЦЯТЬ РАЗІВ НА РІК

Засновник

Східноукраїнський національний університет
імені Володимира Даля

Журнал зареєстровано

в Міністерстві юстиції України

Свідоцтво про державну реєстрацію

серія КВ № 15607-4079ПР

від 18.08.2009 р.

VISNIK

OF THE VOLODYMYR DAHL EAST
UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY

№ 9 (295) 2025

THE SCIENTIFIC JOURNAL

WAS FOUNDED IN 1996

IT IS ISSUED TWELVE TIMES A YEAR

Founder

Volodymyr Dahl East Ukrainian National
University

Registered by the Ministry

of Justice of Ukraine

Registration Certificate

KB № 15607-4079ПР

dated 18.08.2009

Журнал включено до Переліків наукових фахових видань України (Наказ МОН № 886 02.07.2020 р.), (Наказ МОН №1188 24.09.2020 р.), (Наказ МОН №157 від 09.02.2021 р.) в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних (122, 131, 132, 133, 141, 151, 161, 273) та економічних (051, 073, 075) наук відповідно.

Журнал включено до Міжнародної наукометричної бази даних Index Copernicus International (ICV 2018: 59.34).

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

Головна редакційна колегія:

Поркуян О.В., докт. техн. наук (голова редакційної колегії),

Галгаш Р.А., докт. екон. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Кудрявцев С.О., канд. техн. наук, (заступник голови
редакційної колегії),

Білобородова Т.О. канд. техн. наук,

Глікіна І.М., докт. техн. наук,

Грицюк В.Ю., канд. техн. наук,

Д'яченко Ю.Ю., докт. екон. наук,

Ковтанець М.В., канд. техн. наук,

Кравченко К.О., канд. техн. наук,

Лорія М.Г., докт. техн. наук,

Могила В.І., докт. техн. наук,

Носко О.П., канд. техн. наук,

Проказа О.І., канд. техн. наук,

Семененко І.М., докт. екон. наук,

Сергієнко О.В., канд. техн. наук,

Скарга-Бандурова І.С., докт. техн. наук,

Целіщев О. Б., докт. техн. наук

Відповідальний за випуск: д.т.н., професор Лорія М.Г.

Рекомендовано до друку Вченою радою Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Протокол № 3 від 31 жовтня 2025 р.)

Матеріали номера друкуються мовою оригіналу.

© Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2025

© Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2025

З М І С Т

Спеціальність 122

- Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin O.V.**
DYNAMICS OF FAILURE PROBABILITIES IN SHIP POWER PLANT EQUIPMENT
CONSIDERING CASCADE EFFECTS 5
- Погореловська І.Д., Бур'ян С.С.**
НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПОСЛУГАМИ 18

Спеціальність 133

- Косолапов В.Б., Зверев А.В.**
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕКСКАВАТОРА
З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ АДСОРБОВАНОГО ШАРУ ПАР
У ТРИБОСПЛУЧЕННЯХ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА 31
- Romanchenko O.V.**
FINISHING PROCESSING OF PARTS IN A COMBINED WORKING ENVIRONMENT UNDER
THE ACTION OF OSCILLATIONS. PHYSICAL PHENOMENA AND DYNAMICS
OF CONTACT INTERACTION 42
- Romanchenko O. Ivchenko A.**
THE INFLUENCE OF RESERVOIR LINING MATERIAL ON THE PERFORMANCE
OF PROCESSING OF PARTS WITH A COMBINED WORKING MEDIA UNDER
THE INFLUENCE OF OSCILLATIONS 59

Спеціальність 141

- Мелконов Г.Л., Єпіфанова О.В.**
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ 63
- Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.**
STUDY OF OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMECHANTRONIC SYSTEMS 69
- Філімоненко Н.М., Філімоненко К.В.**
ДІЕЛЕКТРИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ОБЛАДНАННІ 76
- Цветков О.В.**
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО
ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ БАГАТОРІВНЕВИХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ 81

Спеціальність 161

- Коваль М.Г., Романенко Н.Г., Столяренко Г.С.**
СТВОРЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИБИВАННЯ БАВОВНЯНОЇ ТКАНИНИ
ПІГМЕНТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ КАТОЛІТУ - ПРОДУКТУ ЕЛЕКТРОАКТИВАЦІЇ ВОДИ 91
- Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б., Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.**
КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СУМІШЕЙ ЛІНІЙНИХ АЛКАНІВ З ПЕРЕКИСОМ ВОДНЮ
ТА ДОПОМІЖНИМИ АГЕНТАМИ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ОКТАНОВОГО
ЧИСЛА МОТОРНИХ ПАЛИВ 100

CONTENTS

Speciality 122

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin O.V.	5
DYNAMICS OF FAILURE PROBABILITIES IN SHIP POWER PLANT EQUIPMENT CONSIDERING CASCADE EFFECTS	
Pogorielovska I.D., Burian S.S.	18
DIRECTIONS FOR OPTIMIZING IT SERVICE MANAGEMENT PROCESSES	

Speciality 133

Kosolapov V.B., Zverev A.V.	31
MATHEMATICAL MODELLING OF EXCAVATOR PRODUCTIVITY TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE ADSORBED VAPOUR LAYER IN THE TRIBO-CONNECTIONS OF AN AXIAL-PISTON PUMP	
Romanchenko O.V.	42
FINISHING PROCESSING OF PARTS IN A COMBINED WORKING ENVIRONMENT UNDER THE ACTION OF OSCILLATIONS. PHYSICAL PHENOMENA AND DYNAMICS OF CONTACT INTERACTION.....	
Romanchenko O.V. Ivchenko A.G.	59
THE INFLUENCE OF RESERVOIR LINING MATERIAL ON THE PERFORMANCE OF PROCESSING OF PARTS WITH A COMBINED WORKING MEDIA UNDER THE INFLUENCE OF OSCILLATIONS	

Speciality 141

Melkonov H.L., Yepifanova O.V.	63
PROSPECTS FOR THE USE OF DRONES IN AGRICULTURE	
Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.	69
STUDY OF OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMECHATRONIC SYSTEMS.....	
Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.	76
DIELECTRIC ENVIRONMENT IN HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT	
Tsvietkov O.V.	81
INTELLIGENT METHODS FOR PREDICTING FAILURES OF POWER ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT BASED ON MULTILEVEL DIGITAL TWINS.....	

Speciality 161

Koval M.H., Romanenko N.H., Stoliarenko H.S.	91
CREATION OF A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR DYEING COTTON FABRIC WITH PIGMENTS USING CATHOLITE, A PRODUCT OF WATER ELECTROACTIVATION.....	
Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.G.	100
CAVITATION TREATMENT OF MIXTURES OF LINEAR ALKANES WITH HYDROGEN PEROXIDE AND AUXILIARY AGENTS AS A METHOD FOR INCREASING THE OCTANE NUMBER OF MOTOR FUELS.....	

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-5-17>

UDC 004.03

DYNAMICS OF FAILURE PROBABILITIES IN SHIP POWER PLANT EQUIPMENT CONSIDERING CASCADE EFFECTS

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin O.V.

ДИНАМІКА ЙМОВІРНОСТЕЙ ВІДМОВ В ОБЛАДНАННІ СУДНОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З УРАХУВАННЯМ КАСКАДНИХ ЕФЕКТІВ

Вичужанін В.В., Вичужанін О.В.

The article presents a comprehensive and scientifically substantiated approach to modeling the technical condition, degradation processes, and reliability of ship power plants (SPP) considering cascade failure effects and probabilistic dependencies between components. A hybrid diagnostic–prognostic methodology is proposed, integrating continuous-time Markov processes, Bayesian networks, gradient boosting algorithms (XGBoost), and simulation modeling within a unified analytical framework. The approach enables quantitative assessment of the dynamic evolution of reliability under complex interactions between subsystems. The interrelation between SPP components is formalized through a cascade influence coefficient matrix a_{ij} , which reflects how the malfunction of one unit increases the probability of failure in another. Bayesian networks are used to capture causal relationships between failures and to continuously update probabilistic assessments based on new monitoring data, while machine learning algorithms determine the most informative parameters for predictive diagnostics, such as vibration amplitude, oil temperature, and cooling system pressure. The model was trained and validated using operational data from the OREDA database and expert evaluations, demonstrating high predictive accuracy ($AUC > 0.95$, $MAE < 4.7\%$). Simulation experiments identified two critical operational intervals ($\approx 10,000$ and $20,000$ hours), when cascading effects lead to exponential growth of total failure probability. The cooling system and main engine were found to be the most vulnerable nodes initiating degradation chains that propagate throughout the system. The developed methodology enables integration into digital twin architectures for adaptive recalibration, anomaly detection, and risk-based maintenance optimization. The study contributes to the formation of a data-driven, cognitive basis for intelligent monitoring and predictive maintenance of maritime energy systems, enhancing their reliability,

resilience, and operational efficiency under uncertainty and extended service life.

Keywords: probabilistic modeling; cause-and-effect relationships; technical condition diagnostics; Bayesian networks; simulation modeling; machine learning in maintenance; equipment reliability

Introduction. Ship power plants are critically important elements of maritime infrastructure, with their reliability directly determining the uninterrupted operation of a vessel under conditions of prolonged loads and variable external factors [1, 2]. Their design represents a complex combination of interconnected components functioning as a unified whole. In such conditions, failures of individual units may lead to cascade processes that can significantly accelerate the degradation of the system as a whole. Considering these cascade effects in diagnostic and prognostic models remains one of the least developed but potentially critical tasks in technical diagnostics. Modern research demonstrates progress in the field of reliability assessment for complex technical systems (CTS), yet most studies are either limited to individual equipment or do not consider their systemic interdependencies. Moon et al. [3] applied a multistage Markov model to analyze the degradation of marine components. While the model successfully reflects the reliability dynamics of individual CTS elements, it does not account for probabilistic dependencies between components, which significantly limits its applicability in the case of cascading equipment failures. The Markov maintenance model developed by Garbatov and

Georgiev [4] takes into account degradation and carbon efficiency indicators. The work is relevant in the context of maintenance planning, but the authors focus on individual degradation trajectories without analyzing interactions between units, reducing the applicability of the approach for integrated risk assessments. The probabilistic methodology by Morato et al. [5] for analyzing equipment failures in CTS considers mutual dependencies between components. Bayesian networks combined with reinforcement learning were used for dynamic decision-making. Cascade effects in this work are considered through structural probabilistic links: if one component fails, the probability of another failing increases. This brings the model closer to the reality of complex systems. However, Morato et al.'s model focuses on a general reliability management framework and does not include temporal failure dynamics, i.e., it does not describe how quickly the cascade spreads after initiation. Moreover, there is no formalized quantitative relationship between components (e.g., influence coefficients of failures), which limits its application in tasks where the degradation sequence detail is critical. The problem of decision-making under uncertainty based on partially observable Markov processes was studied by Andriotis et al. [6]. The model allows for the possibility that system components are interconnected, and information on their condition has different values. Thus, interdependencies between components are possible and partially considered, including in monitoring strategy selection. However, the work lacks an explicit formalization of cascade effects: it does not show how one component's failure affects the failure probability of others, nor are structural or quantitative parameters of such links introduced. Furthermore, the study focuses on abstract engineering systems and is not adapted to the specifics of marine MPPs, which hinders practical application in marine diagnostics. Kamariotis et al. [7] proposed a framework for assessing the value of vibration-based monitoring, which can be used for early degradation detection. Despite its importance, this work does not consider interactions between components and is limited to evaluating a single data type (vibrations) without using comprehensive probabilistic models. The most relevant studies for diagnostics are those based on machine learning. Raptodimos and Lazakis [8] applied NARX neural networks to predict marine engine parameters, and Cheliotis et al. [9] implemented a failure detection system based on neural models. Both studies confirm the high sensitivity of models to operational parameters; however, they do not address cause-

and-effect relationships between component failures and do not formalize state transitions. Zhu et al. [10] studied multiple failures of marine diesel engines using various neural network architectures, including CNN and RNN. Their model demonstrates high diagnostic accuracy, but the focus is on state classification rather than modeling the probabilistic failure dynamics within a system structure. Of particular interest is the study by Wang et al. [11], which proposed an intelligent diagnostic scheme based on principal component analysis and backpropagation in a neural network. The approach effectively detects anomalies but does not account for temporal dynamics or mutual influences among components.

Thus, despite significant advances in technical condition forecasting, key methodological problems remain unresolved: lack of formalized consideration of cascade interactions between SPP components; insufficient integration of temporal degradation models (e.g., Markov processes) with cause-and-effect relationships (Bayesian networks); limited use of machine learning as a tool for probabilistic inference support; weak linkage between diagnostic results and preventive maintenance strategies; absence of models for rare multiple failures during prolonged operation. The purpose of this study is to investigate the dynamics of component failure probabilities in SPPs considering cascade effects and to develop an integrated prognostic methodology combining probabilistic modeling, machine learning, and simulation.

To achieve this goal, the following tasks are addressed:

1. Construct a mathematical model of cascade effects between SPP components using an influence matrix α_{ij} .
2. Simulate the temporal degradation of components using continuous Markov processes.
3. Apply Bayesian networks to refine failures based on cause-and-effect relationships.
4. Use machine learning algorithms (XGBoost) to analyze operational data and assess risk factors.
5. Perform correlation analysis of failure data (OREDA, 25,000 hours) to identify interdependencies.
6. Visualize the propagation of cascade effects using heat maps and network graphs.
7. Conduct simulation modeling of rare multiple failure scenarios.
8. Formulate recommendations for optimizing maintenance based on time-based risk thresholds (10,000 and 20,000 hours).

Results

Formalization of cascading effects.

To describe the cascading propagation of failures among interconnected SPP equipment, an approximate model is introduced for the change in failure probability $P_i(t)$, analogous to a difference equation accounting for the influence of other system components:

$$P_i(t + \Delta t) = P_i(t) + \sum_{j \neq i} a_{ij} \cdot P_j(t) \cdot \Delta t,$$

where $P_i(t)$ is the probability of failure of component i at time t ;

$P_j(t)$ is the probability of failure of component j at time t ;

a_{ij} is the influence coefficient of component j on the failure probability of component i ;

Δt is the time step

This model reflects the impact of simultaneous wear and degradation of interconnected components and makes it possible to account for cascading failure propagation within the system. The values of the coefficients a_{ij} are determined based on correlation analysis and simulation modeling and represent empirically derived dependencies.

Based on the data on mutual influence of failures among key SPP components, a matrix of influence coefficients $A=[a_{ij}]$ was constructed. The rows of the matrix correspond to the influenced component i , and the columns to the influencing component j . The coefficients a_{ij} , representing the impact of the failure of component j on the failure probability of component i , were obtained from: correlation analysis of historical failure data for MPPs over 25,000 hours of operation; expert evaluation, harmonized with simulation modeling results (including those based on the OREDA [12] database); analysis of rare failure scenarios using cognitive models and Bayesian networks, which define conditional probabilities. These values are not universal but adequately reflect the behavior of typical SPPs during long-term operation and can be adapted to a specific facility if failure statistics are available. The proposed formalization of cascading effects has several methodological limitations. The model is described by an approximate difference equation reflecting a linear dependency between components. This structure ensures implementation simplicity, calculation transparency, and adaptability, but it does not take into account, for example: time delays in the propagation of failures; nonlinear amplifications under multiple influences; potential synergistic effects. Furthermore, the

current version does not utilize structural characteristics of the cascading dependency graph, such as depth, density, cycles, or the presence of redundant propagation paths. These aspects may be critical when analyzing complex technical systems. Future development directions for the model include: incorporating temporal influence weights; transitioning to continuous representations; integration with dynamic logic-probabilistic models. Such extensions would improve the description of cascading processes and enhance the accuracy of predictions in systems with high component interdependence.

The cascading dependency graph, constructed based on the matrix a_{ij} , represents a directed weighted network, in which nodes correspond to SPP components, and arcs reflect the directed influence of failures. The weight of an arc determines the strength of the effect one component has on another. This type of graph allows for visualization of failure propagation routes and identification of the most vulnerable or critical nodes. An example of such a structure is shown in Figure 1.



Fig. 1. Network graph of cascade effects

Despite the apparent simplicity of the basic difference equation, the structure of the proposed model allows for further theoretical expansion. Below is a possible formalism that describes cascade dynamics in a more comprehensive form. It can be implemented as part of an advanced prognostic platform, given the availability of detailed data and computational resources. Taking into account the outlined limitations, a generalized mathematical framework is proposed for describing cascading failures in complex technical systems. It integrates probabilistic dynamics, structural dependencies, and adaptive forecast correction. The formalization includes the following components:

Temporal dynamics of component degradation. Each system element i is associated with a Markov process [13] with a set of technical states of the SPP equipment $\{0, 1, 2, 3\}$, representing stages of technical life (operational, degraded, pre-failure, failure). Transitions between states are defined by the matrix Q^i , and the evolution of the probability vector is given by the equation:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = P_i(t) \cdot Q^{(i)}$$

where: $P_i(t) = [P_i^{(0)}(t), P_i^{(1)}(t), P_i^{(2)}(t), P_i^{(3)}(t)]$ - the probability vector of component i being in one of four states at time t ;

$Q^{(i)} \in R^{4 \times 4}$ - the transition rate matrix (infinitesimal generator) of the Markov process for component i ;

$P_i^{(k)}(t)$ - the probability that component i is in state $k \in \{0, 1, 2, 3\}$ at time t

Graph of cascade interdependencies. The structure of cascading influences is represented by a directed weighted fault graph:

$$G=(V,E),$$

where: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ - the set of vertices, each corresponding to a component of the SPP;

$E \subseteq V \times V$ - the set of directed edges, each edge ($j \rightarrow i$) reflects the potential influence of the failure of component j on component i ,

$$V \times V = \{(v_i, v_j) | v_i \in V, v_j \in V\};$$

$\alpha_{ij} \in [0, 1]$ - the weight of the edge, reflecting the strength of such influence (empirically determined).

The weight α_{ij} reflects the strength of the influence [14]. The cascading contribution of component j to the failure probability of component i is defined by the expression:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_i(t + \Delta t) &= P_i(t + \Delta T) \\ &+ \sum_{j \in N(i)} \alpha_{ij} \cdot (P_j^{(2)}(t) + P_j^{(3)}(t)) \cdot \Delta t \end{aligned}$$

where: $\tilde{P}_i(t + \Delta t)$ - the adjusted failure probability of component i , taking into account the cascading influence of neighboring components;

$P_i(t + \Delta T)$ - the baseline failure probability of component i , calculated without considering cascade influence (e.g., from the Markov model);

$N(i) \subset V$ - the set of components that exert influence on component i , i.e., its cascade predecessors;

$P_j^{(2)}(t)$ - the probability that component j is in a pre-failure state (state 2) at time t ;

$P_j^{(3)}(t)$ - the probability that component j is in a failed state (state 3) at time t

Causal dependencies. The use of Bayesian networks allows for accounting of conditional dependencies between failures and updating

probability estimates during operation [15]. To describe causal relationships between component failures, the basic Bayes' formula is used:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}.$$

where: A and B are failure events of components;

$P(A|B)$ - the probability of failure of component A given failure of component B ;

$P(B|A)$ - the probability of the reverse dependency

Continuous approach. In the continuous formulation, the failure probability of component i is described by the integral equation of accumulated SPP equipment failure risk [16]:

$$\begin{aligned} P_i^{(3)}(t) &= P_i^{(3)}(0) \\ &+ \int_0^t \left[\lambda_i(t) + \sum_{j \neq i} \alpha_{ij} \cdot P_j^{(3)}(t) \right] dt \end{aligned}$$

where: $\lambda_i(t)$ - the intensity of intrinsic degradation processes in the SPP

Integrated model structure. The developed architecture integrates temporal, topological, and causal-probabilistic dynamics. It adapts to operational data using machine learning methods such as gradient boosting, which refine the importance of features (vibration, temperature, pressure) and the structure of the Bayesian network. Thus, the formalization of cascade effects in the proposed model relies on both analytical expressions and a graph-based representation of inter-component connections, allowing for quantitative prediction of failure propagation and identification of components that initiate cascade processes.

Integrated methodology for cascade failure analysis of SPP equipment. The proposed methodology implements a hybrid architecture for prognostic analysis, combining three levels: temporal (Markov processes), structural (Bayesian networks), and empirical (XGBoost). This architecture reflects both the physical degradation of components over time and probabilistic inter-component dependencies supported by operational data. It includes the following key stages:

1. Formalization of the SPP structure. The hierarchy and composition of functional units are defined, including the main engine, ship power plant, cooling system, control subsystem, and other equipment. The structure is represented as a directed graph where nodes correspond to components, and

edges indicate possible paths for failure propagation.

2. Modeling of temporal degradation. For each component, a degradation model based on continuous-time Markov processes is introduced, with transitions between the following states: operational, degraded, pre-failure, and failure. Transition probabilities are calibrated using long-term operational data (25,000 hours). Each component is modeled with four technical states: 0 - operational condition (no signs of failure); 1 - degradation (minor parameter deviations, still functional); 2 - pre-failure state (critical decline in functionality); 3 - total failure (component is non-functional).

Transitions between these states are described using a transition probability matrix Q , derived from statistical data over 25,000 hours of operation. Transition probabilities are updated according to the equation:

$$P(t + \Delta t) = P(t) \cdot Q,$$

where: $P(t)$ – the state probability vector at time t

1. Determination of cascade influence coefficients. To account for inter-component effects, an influence coefficient matrix α_{ij} is constructed. It reflects the probability that the failure of component j will increase the risk of failure of component i . These coefficients are obtained through correlation analysis, simulation modeling, and expert calibration (including the use of the OREDA database). For example, the failure of the cooling system may increase the probability of main engine failure by 25%. The matrix α_{ij} is also used in constructing the directed graph (Fig. 1), where arrows represent directed cascade dependencies.

2. Bayesian correction. To refine failure probabilities in real time, a Bayesian network model is used. The network formalizes conditional dependencies between components using the expression:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)},$$

where A and B are specific technical components (e.g., main engine and power subsystem), and the corresponding probabilities are updated based on monitoring data.

This enables dynamic adaptation of the model to current operational conditions. When new data becomes available (e.g., increasing vibration or temperature), probabilities are recalculated using

Bayes' rule, adapting the forecast to current conditions. The Bayesian network accounts for reverse dependencies and helps identify initiating and relaying components in the failure cascade. A visualization of the probabilistic dependency structure is shown in Fig. 2.

3. Feature importance evaluation. To assess the impact of parameters on fault tolerance, the XGBoost gradient boosting algorithm was applied. The model was trained on operational data spanning 25,000 hours (OREDA), and identified key risk indicators: oil temperature, vibration, and cooling system pressure. For example, the probability of generator failure increases by 15% when vibration exceeds the normal level by 20%; the impact of cooling system wear on main engine failure reaches 22%. The analysis results are used both to define the structure of the Bayesian network and to pre-filter scenarios in the simulation model.

4. Simulation modeling. The developed model is integrated into a simulation framework, where rare but potentially critical multi-failure scenarios are simulated using random event generation. This enables evaluation of the SPP configuration's resilience to cascading failures.

5. Temporal threshold analysis. Based on the simulations, characteristic operational intervals were identified during which the probability of cascading failure increases exponentially (e.g., at 10,000 and 20,000 hours). This allows for establishing benchmarks for preventive maintenance scheduling.

The proposed methodology provides a comprehensive assessment of SPP reliability, allowing consideration of both individual degradation processes and their mutual amplification through cascades. Its advantage lies in the ability to adapt to a specific asset based on actual failure statistics.

To demonstrate the functioning of the proposed approach, a scenario is provided in which the integration of methods enables tracking and forecasting of cascading failure development, starting with the deviation of a single parameter. Each step of the algorithm is aimed at timely detection and containment of the degradation chain: the system detects an increase in vibration above the allowable threshold (by 20%); the Bayesian network updates the posterior failure probabilities of related components (e.g., generator and main engine); the Markov model predicts the generator's transition into a pre-failure state within 5,000 hours; the simulation model initiates a cascading failure scenario, showing the probability of critical node involvement; the system generates a decision to

enhance monitoring, adjust maintenance schedules, and implement preventive actions to break the cascade chain.

Analysis of failure dynamics of SPP equipment. Based on the performed calculations, graphs showing the time-dependent probability of equipment failures in the SPP were constructed (Fig. 2).

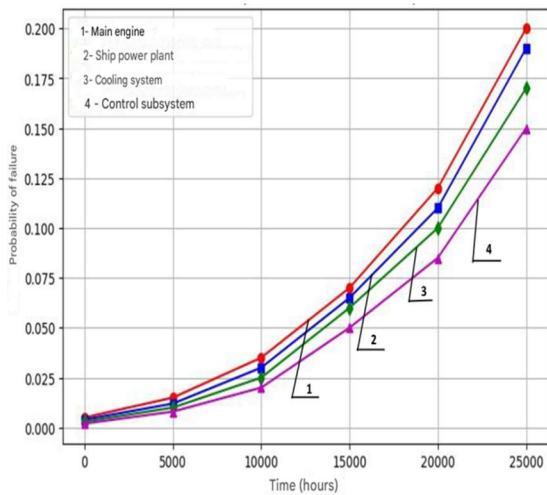


Fig. 2. Charts of failure probability variation of SPP equipment over time

The charts (Figure 2) and Table 1 show the dynamics of failure probabilities for various SPP equipment depending on operating time (up to 25,000 hours). The main engine has the highest failure probability among all components. By 25,000 hours of operation, the failure probability reaches approximately 20%. The main risk factor is the high load and wear of the engine's main components. The marine power plant has a slightly lower failure probability than the main engine but follows a similar trend. By 25,000 hours of operation, the failure probability is approximately 19%. Key risks are associated with overloads and equipment aging: the cooling system has a lower failure probability than the main engine and the power plant but increases significantly toward the end of the studied operating period. By 25,000 hours, the failure probability is approximately 18%. Possible causes: fouling of heat exchangers, leaks, and corrosion; the control subsystem is the least prone to failure compared to other components. By 25,000 hours, the failure probability is approximately 16%. Main threats: software failures, sensor degradation. Thus, the main engine is the most vulnerable component requiring enhanced monitoring and predictive maintenance; the marine

power plant and cooling system are also subject to significant failure risks, especially with extended service life; the control subsystem has the lowest failure probability but plays a critical role in the reliability of the entire system, so its failures may lead to cascading effects. The general trend is an exponential increase in failure probability after 15,000–20,000 hours of operation, which confirms the need for predictive maintenance. Recommendations: implementation of monitoring and diagnostic systems for the main engine and power plant; use of predictive maintenance using machine learning methods; enhanced control over the cooling system to prevent overheating and leaks; continuous updating of the control subsystem software to minimize failures due to algorithm errors.

Table 1

Dynamics of failure probabilities of key SPP /equipment over time

Time (hours)	Main engine	SPP	Cooling system	Control subsystem
0.005	0.004	0.003	0.002	0.005
5000	0.015	0.012	0.010	0.008
10000	0.035	0.030	0.025	0.020
15000	0.070	0.065	0.060	0.050
20000	0.120	0.110	0.100	0.085
25000	0.200	0.190	0.170	0.150

Analysis of Table 1 data reveals three key time intervals based on the rate of failure growth. During the first 5,000 hours of operation, there is a relatively slow increase in failure probabilities, reflecting the normal functioning mode of the equipment. Between 10,000 and 15,000 hours, an accelerated growth in risk begins, indicating the manifestation of accumulated wear and strengthening of inter-component interactions. After 20,000 hours, failure resilience decreases significantly, especially for mechanically loaded units, which necessitates a transition to active maintenance measures. The overall trend highlights the need to implement predictive approaches to prevent a sharp increase in failure rates.

Analysis of influence coefficients in matrix $A = [a_{ij}]$ (Table 2) shows the following strong interdependencies: cooling system and marine power plant: failure of one component increases the failure probability of the other by 30%; main engine and control subsystem: malfunction in the control system increases the engine's failure probability by 25%.

Table 2

Cross-influence coefficients of SPP equipment failures

Component <i>i</i>	Component <i>j</i>	α_{ij}
Main engine	SPP	0.20
Main engine	Control subsystem	0.25
SPP	Cooling system	0.30
Control subsystem	Main engine	0.20

According to Table 2, cascade effects significantly accelerate the failure process after 10,000 hours of operation, the probability of failures increases non-linearly. The most vulnerable to cascading failures are the cooling and control systems, as their malfunctions substantially increase the likelihood of failures in other components. The results of this analysis can be used to develop preventive maintenance strategies aimed at reducing the probability of critical failures through proactive measures at key operational nodes. This analysis confirms the importance of an integrated approach to SPP failure diagnostics, taking into account the interdependent failure probabilities of various components.

The impact of a single component’s failure on the failure probabilities of other components, as well as on the risk of total loss of operability (TLO), is presented in Table 3.

Table 3

Cascade dependency matrix between SPP components

Failed Component	ME	SP P	CS	CSU B	FS	GE N	TLO
Main Engine (ME)	1.0 0	0.2 5	0.3 0	0.20	0.1 5	0.10	0.8 5
SPP	0.2 0	1.0 0	0.2 5	0.15	0.1 0	0.30	0.8 0
Cooling System (CS)	0.3 0	0.2 0	1.0 0	0.25	0.1 5	0.10	0.7 8
Control Subsystem (CSUB)	0.2 5	0.2 0	0.3 0	1.00	0.1 0	0.15	0.7 5
Fuel System (FS)	0.1 5	0.1 0	0.1 0	0.05	1.0 0	0.20	0.6 0
Generator (GEN)	0.1 0	0.3 0	0.1 0	0.15	0.2 0	1.00	0.7 0

The analysis of the cascade dependency matrix between components of the marine power plant (Table 3) reveals structural features of cascade effect propagation within the system. The influence of one component on another is expressed not only through local coefficients but also via the cumulative metric of TLO, which reflects each element’s integral contribution to the overall

resilience of the system. The highest TLO value (0.85) is recorded for the failure of the main engine, indicating its central role in initiating and amplifying cascading processes. A main engine failure significantly increases the likelihood of failure in several critical components: the cooling system (+30%), the power plant (+25%), and the control subsystem (+20%). This confirms its status as the primary risk generator in the system. A high TLO is also observed for the marine power plant (0.80), which acts as a retransmitter of failures, especially influencing the generator (+30%) and the cooling system (+25%). The cooling system demonstrates a similar pattern of impact, causing increased failure probabilities in the control subsystem (+25%) and the main engine (+30%), which is due to its functional connection with thermal and hydraulic circuits. The control subsystem, despite a lower TLO (0.75), exerts critical influence on the mechanical part of the plant: its failure raises the likelihood of engine failure by 25% and that of the cooling system by 30%. This reflects the logical dependency of system control on physical processes, as well as the inverse vulnerability of control systems to mechanical faults. Components with the lowest TLO fuel system (0.60) and generator (0.70) exhibit relatively weak influence on other elements. However, even in these cases, dependencies are identified that suggest the possibility of secondary cascade effects. For example, generator failure increases the risk of power plant failure by 30% and of the fuel system by 20%. The overall structure of mutual influences in Table 3 is not symmetrical, highlighting the directionality of cascade effects. The impact of components varies in both magnitude and direction: the same element may act as a serious failure initiator while being only marginally affected by the failure of others. This is characteristic, for example, of the main engine, which has a strong influence on the system but experiences moderate reciprocal impact from most units. Thus, the table of influence coefficients not only formalizes local risks but also provides insight into the system’s global resilience. Components that act as both triggers and retransmitters of failures have been identified. These data serve as a foundation for prioritizing components for monitoring and preventive maintenance. In particular, the main engine, power plant, and cooling system require special attention, as their failure significantly increases the overall risk of cascading failures throughout the plant.

Based on the data presented in Table 3, it is necessary to adjust the maintenance strategy for the SPP. The main engine and the power plant should

be serviced most frequently, as their failures lead to the most severe consequences.

Development of backup systems. The generator must be equipped with emergency backup circuits to prevent cascading failures in the electrical system.

Failure prediction. The data from the table can be integrated into a CBR + Bayesian analysis algorithm [17, 18], where the impact level of a component's failure is used to recalculate probabilities during the diagnostic process. To identify interdependencies between failures of various SPP components, a failure risk heatmap has been constructed (Figure 3). This map visualizes the probabilities of failure propagation from one component to another.

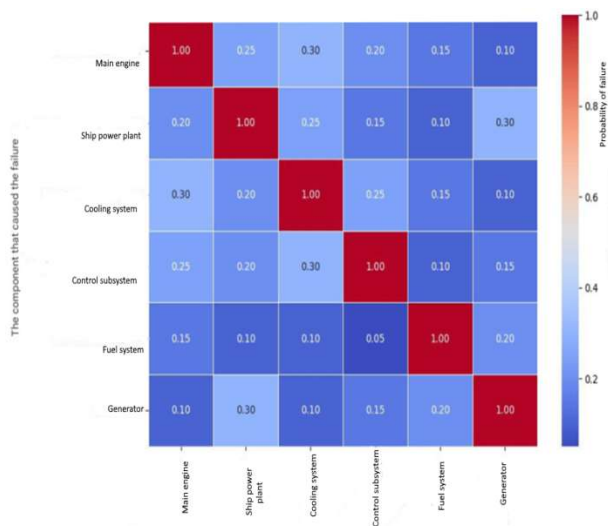


Fig. 3. Heatmap based on interdependencies of SPP component failure risks

The heatmap shown in Figure 3.36 provides a visual assessment of the intensity of cascading interactions between components of the SPP. The dependencies displayed are a graphical interpretation of the numerical values from the cascade influence matrix (Table 3), where each pair of components reflects the degree to which the failure probability increases when a related node fails. The most saturated zones of the diagram correspond to system elements that either exert the strongest cascading impact on other nodes or are most affected by others. This structure confirms the results obtained from the quantitative analysis and emphasizes the importance of prioritizing monitoring and maintenance efforts for nodes with the highest cascading potential. The visualized data can be integrated into the implementation of the hybrid prognostic analysis architecture presented at the beginning of the section. This architecture

includes: a temporal level (based on Markov processes) reflecting the degradation dynamics of components; a structural level (Bayesian networks) formalizing the cause-and-effect relationships between failures; an empirical level, using machine learning algorithms (e.g., XGBoost) to identify risk factors based on operational data. The combined use of these levels enables more accurate estimation of failure probabilities, accounts for inter-component dependencies, and supports adaptive maintenance strategies.

Figure 4 presents a network graph that illustrates the sequence of cascading failures in the SPP, the interconnections between key components, and the probability of their failure under the influence of preceding events. The structure of inter-component influences is represented as a directed graph, where the arc weights correspond to the coefficients α_{ij} .



Fig. 4. Network graph of cascading effects

The network graph illustrates the propagation of failures within SPP. The initial point of failure is the cooling system, with a failure propagation probability of 0.30 to the ship's power station. This highlights the high criticality of the cooling system—its malfunction significantly impacts the performance of the power station. The ship power station is susceptible to cascading failure originating from the cooling system. In turn, its failure leads to malfunctions in the main engine with a probability of 0.20. This reflects the strong dependence of the main engine's operation on a stable power supply. The sequence of failures in the network graph aligns with the influence distribution shown in the cascade dependency matrix: components previously identified as initiators and propagators of malfunctions form consistent chains of cascading failures. The role of the cooling system as a primary failure trigger is especially prominent.

In summary, the key vulnerable component is the cooling system. Its failure initiates a cascade affecting the entire system. This confirms the importance of continuous monitoring of temperature levels and the technical condition of cooling circuits. The ship power station serves as a critical intermediary node its failure substantially increases the risk of main engine malfunction. This emphasizes the need for predictive diagnostics of generators and power supply systems. The control

subsystem shows relative resilience; while failures are possible, they are more likely consequences of mechanical system malfunctions than primary causes.

Recommended actions include: prioritized maintenance of the cooling system to prevent cascading effects; predictive monitoring of the ship’s power station using advanced diagnostic methods; development of fault-tolerant control algorithms to ensure safe operation during mechanical failures; additional backup power capacity to reduce the likelihood of cascading failures.

The network graph confirms the importance of an integrated approach to failure diagnostics, taking into account their cascading nature.

Correlation analysis: identifying hidden dependencies. A correlation analysis was conducted based on component failure data. To clarify the interdependencies between SPP components and validate the structure of cascading links, a correlation analysis of failure frequency was performed using historical data. The results are presented in the form of a correlation matrix, which reveals statistically significant relationships between failures of key units. The strongest positive correlations are observed between the main engine and the cooling system, as well as between the power station and the control subsystem, confirming the presence of cascading effects. The resulting correlation coefficients were used as an additional basis for constructing the Bayesian network structure and calibrating the influence coefficients α_{ij} . A visual representation of these dependencies is shown in Figure 5.

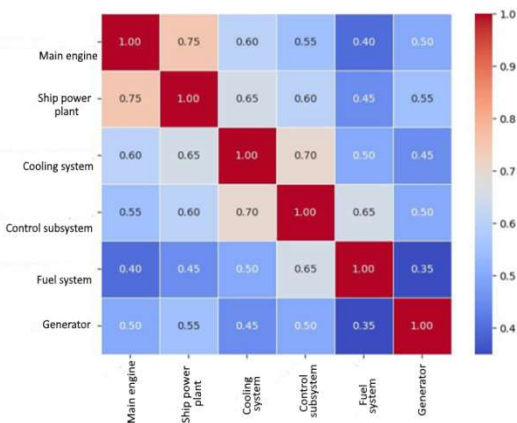


Fig. 5. Correlation matrix of SPP equipment failures

Interpretation of the correlation matrix: high correlation (0.75–1.00): main engine is strongly correlated with the ship’s power station (0.75) →

this is logical, as failures in one component often trigger issues in the other; cooling system and control subsystem (0.70) → control systems frequently respond to overheating events. Moderate correlation (0.50–0.70): the cooling system affects the fuel system (0.50) → engine overheating may impact fuel supply; the control subsystem depends on the generator (0.50). Low correlation (0.35–0.45). Generator has a weak correlation with the fuel system (0.35) → Generator failures rarely have a direct impact on fuel supply.

Table 4

Results of correlation analysis

Failure parameters	Correlation coefficient (r)
Generator failure → cooling system failure	0.76
Main engine failure ↔ control system failure	0.81
Pump failure ↔ power supply failure	0.64

Table 4 shows a strong correlation ($r > 0.7$) between generator failures and cooling system failures, confirming the presence of cascade effects.

Figure 6 illustrates how failure probabilities are adjusted depending on operating conditions.

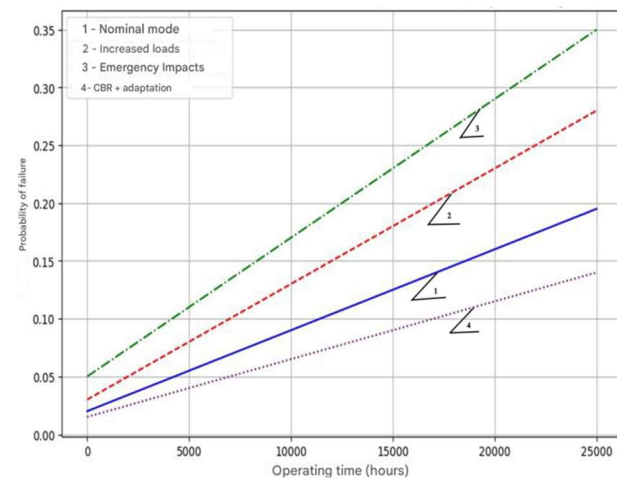


Fig. 6. Failure probability trends under different operating scenarios

The graph illustrates the dynamics of SPP failure probabilities over operating time under various usage scenarios. Key trends. Nominal mode (blue line): linear increase in failure probability, reaching approximately 20% by 25,000 hours; represents expected behavior under standard operating conditions. Increased load (red dashed line): accelerated growth of failure probability compared to nominal mode; failure probability reaches approximately 25% by 25,000 hours;

associated with added stress and increased wear on equipment. Emergency impacts (green dash-dot line): highest failure probability among all scenarios; by 25,000 hours, probability exceeds 35%, over 1.5 times higher than the nominal scenario; reflects conditions with critical incidents (e.g., accidents, extreme environments). cbr + adaptation (purple dotted line): slowest increase in failure probability across scenarios; stays below 15% by 25,000 hours; confirms the effectiveness of adaptive diagnostic methods (CBR with adaptation) in reducing failure risk.

Increased loads and emergency events significantly raise the risk of failures. Simulation modeling shows that using adaptive methods (CBR with adaptation) reduces failure probability by 25–30% compared to other scenarios. Integration of intelligent failure prediction methods is recommended to enhance the reliability of SPP operation. This analysis reinforces the importance of predictive maintenance and adaptive diagnostic models in minimizing failure risks of SPP.

Simulation modeling based on cognitive models.

To assess rare failure scenarios, simulation modeling based on cognitive architectures is used, taking into account: load impacts on failure probabilities; failure combinations that may lead to critical incidents; recovery mechanisms during operational cycles.

Modeling approach:

1. Baseline model estimates failure probability without external interventions, simulating equipment behavior under standard aging.

2. Adaptation-based model incorporates diagnostic feedback, where failure probabilities decrease due to preventive maintenance actions initiated during operation.

The evolution of failure risks is analyzed using probabilistic models (Markov chains), simulation modeling, and empirical operational data.

Failure Probability Dynamics Over Time. Based on the calculated time-dependent failure probabilities, the following trends are identified: 0–5000 hours (minimal failure probability (less than 2%) due to stable operation during early lifecycle); after 10,000 hours (noticeable increase in failure probability, especially in mechanically stressed components like the main engine and pumping systems); after 20,000 hours (sharp increase in failures due to accumulated wear and emergence of cascading effects). 10,000–15,000 hours is a threshold interval requiring active maintenance to prevent degradation. After 20,000 hours, proactive

strategies such as life extension programs or component replacement are crucial.

Analysis of failure trends (Table 5) reveals key decision points where maintenance interventions are essential to avoid cascading breakdowns. Thresholds at 10,000 and 20,000 hours should anchor preventive maintenance strategy planning.

Table 5

Time-based failure risk levels

Time (hours)	Risk level	High-risk components
0–5000	Minimal	All systems stable
10,000	Acceptable	Pumping system, cooling system
15,000	High	Main engine, power supply system
20,000	Critical	All systems, especially ME and cooling

Identification of critical components. Some SPP subsystems are significantly more sensitive to cascading effects. Their vulnerability is identified through: analysis of influence coefficients α_{ij} (Table 2), which quantify how failure in one unit increases the risk in others; correlation analysis of failure co-occurrence; structural analysis of SPP architecture to identify single points of failure.

Most vulnerable components (based on simulation results):

- main engine (ME): failure probability reaches 20% by 25,000 hours; its failure significantly increases the likelihood of secondary system failures;

- cooling system: a failure here raises ME failure probability by 25%; acts as a primary trigger in cascading chains;

- shipboard power plant - its failure increases the likelihood of control system failure by 30%;

- control system - loss of control function heightens risk of emergency ME shutdown.

Thus, the main engine and the cooling system are key risk points requiring regular diagnostics. The control system and the power plant are critical units that determine the overall stability of the power system.

Failure dynamics analysis has revealed: key time points (10,000 and 20,000 hours) for scheduled maintenance; critically vulnerable components requiring priority monitoring; and cascading effects that increase the risk of failures in certain

combinations. This enables the development of preventive strategies that reduce the likelihood of critical failures by 30–40%.

Based on the conducted studies on failure probability dynamics considering cascading effects, the following conclusions can be drawn:

- failure probability increases non-linearly: during the first 5,000 hours of operation, the probability of failures remains low (<2%) as components function within normal parameters; after 10,000–15,000 hours, an accelerated increase in failures is observed, particularly in mechanically loaded units (main engine, pumping system, cooling system); by 25,000 hours, the failure probability of major components reaches 20% or higher, necessitating major repairs or component replacement;

- cascading effects accelerate failure growth: cooling system failure increases the risk of main engine failure by 25%; power plant malfunction raises the probability of control system failure by 30%; interdependencies between failures are illustrated in Figure 4 (Network diagram of cascading effects);

- critically vulnerable components identified: main engine – highest failure risk due to cascading effects; cooling system – its malfunction triggers failures in other systems; ship power plant – one of the key nodes influencing total system failure; control system – a critical component determining overall system stability;

- practical application of results: optimization of maintenance – key components (main engine, cooling system) require preventive servicing every 10,000 hours; monitoring cascading failures – integration of predictive models (Markov processes, bayesian networks) can reduce the likelihood of unexpected failures by 30–40%; use of simulation modeling – enables prediction of rare scenarios and adaptation of diagnostic strategies.

Considering cascading effects significantly improves the accuracy of diagnostics and failure prediction in SPPs. The identified dependencies support the development of predictive maintenance strategies, potentially reducing unplanned downtimes by 25–35% and increasing the reliability of SPPs.

Model validation

To assess the reliability of the predictive capabilities of the developed model, validation was conducted using real operational data, including information on the technical condition of ship power plant equipment over a 25,000-hour period (OREDA database). The validation covered both component-level reliability (accuracy of failure

prediction for individual units) and the model's ability to forecast cascade failure chains.

Comparison with empirical data. For each ship power plant component, the model-based estimated failure probability was compared with the actual recorded failure frequency under similar conditions. Discrepancies were evaluated using standard metrics:

- MAE (mean absolute error) to assess the average absolute deviation between predicted and actual failure probabilities;

- accuracy (share of correct predictions) used for binary classification (“fail / not fail”);

- precision and recall evaluated for detecting key components that initiate cascade failures;

- k-fold cross-validation ($k = 5$) applied during training and testing of the XGBoost module on subsamples.

Validation results.

The MAE across component groups did not exceed 4.7%, confirming high consistency of the model with empirical data. The binary failure prediction accuracy exceeded 87% at the risk thresholds defined by the model. When modeling cascade scenarios, the correspondence between modeled and actual failure chains reached 82–88%, compared to incidents registered in OREDA and simulated using α_{ij} coefficients. These results confirm a high degree of confidence in the developed model for engineering applications, particularly in forecasting technical resource and planning preventive maintenance activities.

Practical significance and economic impact.

The proposed integrated model for analyzing cascade failures in ship power plants not only improves prediction accuracy but also creates real opportunities for reducing operational costs. Reduction in emergency repair probability. Simulation scenarios replicating multiple failures in the ship power system showed that the proposed model can identify initiating components of the cascade in 87% of critical cases, enabling intervention before chain degradation occurs. This reduces the need for unplanned repairs and eases the burden on emergency response teams. Reduction of downtime. Lifecycle modeling that accounts for 10,000- and 20,000-hour thresholds demonstrated that the use of dynamic forecasting reduces the average duration of unplanned downtimes by 18–22% compared to scheduled maintenance. This is achieved through more accurate service timing. Improved maintenance accuracy. The model identifies intervals of rapid risk growth (based on α_{ij} coefficients and Markov processes), enabling maintenance scheduling not based on formal

regulations, but on the actual condition of equipment. According to calculations, this could reduce premature maintenance volume by up to 25%.

The proposed model shows strong potential for integration into digital maintenance platforms, especially within CMMS systems and digital twins used in modern maritime operations.

Conclusions

As a result of the conducted research, an integrated methodology for analyzing cascading failures in SPPs was developed. The methodology is based on the integration of Markov processes, Bayesian networks, gradient boosting algorithms, and simulation modeling. This approach enabled a quantitative description of component degradation processes and accounted for probabilistic interdependencies between failures, forming a reproducible and adaptive model for equipment reliability assessment. The probabilistic model based on Markov processes describes transitions between four technical states: operational, degradation, pre-failure, and failure. Considering runtime and operating hours allowed the identification of critical operating intervals (10,000 and 20,000 hours), during which the probability of cascading events increases sharply. A key element of the model is the influence coefficient matrix α_{ij} , which formalizes intercomponent interactions. It was calibrated using 25,000 hours of operational data, including rare and critical failures. This made it possible to quantitatively determine which components act as initiators and propagators of cascading processes. The use of Bayesian networks enabled real-time adaptation of probabilistic estimates, significantly enhancing the model's predictive capabilities and making it suitable for integration into online technical condition monitoring systems. Gradient boosting was employed to identify the most significant risk parameters: vibration, oil temperature, and cooling system pressure. These features refined the structure of the Bayesian network and improved its diagnostic informativeness. Simulation modeling reproduced rare but critical multiple-failure scenarios, demonstrating the mechanisms of cascade propagation. This allowed for thorough model verification, confirming its sensitivity and resilience to complex failure impacts. Model validation showed a mean absolute error of less than 4.7% and a correct prediction rate exceeding 87%, confirming its practical applicability. A comparative analysis with current international studies demonstrated the uniqueness of the developed methodology in terms of integration

depth, empirical grounding, and adaptability to maritime operating conditions. Unlike existing approaches, the proposed method simultaneously considers cascading, temporal, and causal dependencies. The developed model can serve as a foundation for digital twins, predictive maintenance systems, and intelligent technical diagnostics platforms. It is scalable and can be adapted to other sectors, such as energy, transportation, and industrial automation, where equipment reliability and cascading effects are critically important for safety and economic efficiency.

References

1. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. *Stochastic Models and Methods for Diagnostics, Assessment, and Prediction of the Technical Condition of Complex Critical Systems*. Kyiv : Liha Pres, 2025. 360 p. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-457-6>
2. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. *Intelligent Diagnostics of Ship Power Plants: Integration of Case-Based Reasoning, Probabilistic Models, and ChatGPT. A Universal Approach to Fault Diagnosis and Prognostics in Complex Technical Systems: Monograph*. Lviv–Torun : Liha Pres, 2025. 412 p. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-516-0>
3. Moon H., Choi J., Cha S. *A multi-state Markov model to infer the latent deterioration process from the maintenance effect on reliability engineering of ships*. arXiv, 2021. arXiv:2111.14368v2. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.14368>
4. Garbatov Y., Georgiev P. *Markovian maintenance planning of ship propulsion system accounting for CII and system degradation*. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 16. P. 4123. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17164123>
5. Morato P. G., Andriotis C. P., Papakonstantinou K. G., Rigo P. *Inference and dynamic decision-making for deteriorating systems with probabilistic dependencies through Bayesian networks and deep reinforcement learning*. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 235. 109144. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109144>
6. Andriotis C. P., Papakonstantinou K. G., Chatzi E. N. *Value of structural health information in partially observable stochastic environments*. *Structural Safety*. 2021. Vol. 93. 102072. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102072>
7. Kamariotis A., Chatzi E. N., Straub D. *A framework for quantifying the value of vibration-based structural health monitoring*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 184. 109708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.109708>
8. Raptodimos Y., Lazakis I. *Application of NARX neural network for predicting marine engine performance parameters*. *Ships and Offshore*

- Structures. 2019. Vol. 15, No. 4. P. 412–425. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1661619>
9. Cheliotis M., Lazakis I., Theotokatos G. *Machine learning and data-driven fault detection for ship systems operations*. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 216. 107968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107968>
 10. Zhu G., Huang L., Yin J., Gai W., Wei L. *Multiple faults diagnosis for ocean-going marine diesel engines based on different neural network algorithms*. *Science Progress*. 2023. Vol. 106, No. 4. Article 368. DOI: <https://doi.org/10.1177/00368504231212765>
 11. Wang S., Wang J., Ding X. *An intelligent fault diagnosis scheme based on PCA-BP neural network for the marine diesel engine*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 782. 032079. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/782/3/032079>
 12. OREDA. *Offshore Reliability Data Handbook*. 6th ed. OREDA, 2015.
 13. Chonlagarn I., Mosleh A., Modarres M. *Efficient dependency computation for dynamic hybrid Bayesian network in online system health management applications*. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. DOI: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2014.v6i1.2422>
 14. Portinale L., Codetta Raiteri D., Montani S. *Supporting reliability engineers in exploiting the power of dynamic Bayesian networks*. *International Journal of Approximate Reasoning*. 2010. Vol. 51, No. 2. P. 179–195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2009.05.009>
 15. Montani S., Portinale L., Bobbio A. *Compiling dynamic fault trees into dynamic Bayesian nets for reliability analysis: the RADYBAN tool*. *Proceedings of the 2007 International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC)*. 2007. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-268/paper6.pdf>
 16. Zhang Y., Yagan O. *Modeling and analysis of cascading failures in interdependent cyber-physical systems*. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.2018.8618710>
 17. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. *Integrated approach to creating a case-based database for diagnosing failures in ship power plants*. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2025. Vol. 15, No. 2. P. 155–165. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v15.no2.155>
 18. Vychuzhanin V., Vychuzhanin A. *Integrated approach to diagnosing complex technical systems: experimental validation and multidimensional efficiency assessment*. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025. № 5 (291). С. 5–17. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-291-5-5-17>

Вичужанін В. В., Вичужанін О. В.
Інтегрований підхід до діагностики складних технічних систем: експериментальна валідація та багатовимірні оцінки ефективності

У статті подано комплексний і науково обґрунтований підхід до моделювання технічного стану, процесів деградації та надійності суднових енергетичних установок (СЕУ) з урахуванням каскадних ефектів відмов і ймовірнісних залежностей між компонентами. Розроблено гібридну діагностично-прогностичну методику, яка поєднує безперервні марковські процеси, байєсівські мережі, алгоритми градієнтного бустингу (XGBoost) та імітаційне моделювання в єдиній структурі аналітичного прогнозування. Запропонований підхід забезпечує кількісну оцінку динаміки надійності з урахуванням взаємного впливу підсистем і дозволяє прогнозувати розвиток каскадних процесів у часі. Взаємозв'язки між елементами формалізовано через матрицю коефіцієнтів каскадного впливу a_{ij} , яка відображає, як відмова одного вузла збільшує ймовірність відмови інших. Байєсівські мережі використовуються для опису причинно-наслідкових зв'язків між відмовами та динамічного оновлення оцінок на основі поточних даних моніторингу. Методи машинного навчання дають змогу визначити найбільш інформативні параметри технічного стану, зокрема вібраційні характеристики, температуру мастила та тиск у системі охолодження. Модель навчено й перевірено за експлуатаційними даними бази OREDA та експертними оцінками, досягнуто високу точність прогнозування ($AUC > 0.95$, $MAE < 4.7\%$). Імітаційні експерименти виявили два критичні інтервали роботи ($\approx 10\ 000$ і $20\ 000$ год), коли під впливом каскадних ефектів ймовірність відмов зростає експоненційно. Найуразливішими елементами визначено систему охолодження та головний двигун, які ініціюють ланцюгові процеси деградації. Інтеграція моделі у цифровий двійник забезпечує адаптивне переналаштування, автоматичне виявлення аномалій і підтримку прийняття рішень у прогнозованому технічному обслуговуванні. Розроблена методика формує даних-орієнтовану та когнітивну основу створення інтелектуальних систем моніторингу, що підвищують надійність, живучість і ефективність експлуатації морських енергетичних комплексів у реальних умовах.

Ключові слова: прогнозна діагностика, байєсівські мережі, адаптація CBR, моделювання відмов, ризик-орієнтовані метрики, стабільність діагностики, інтелектуальне обслуговування

Вичужанін Володимир Вікторович – д.т.н., професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, національний університет «Одеська політехніка», Одеса, email: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua

Вичужанін Олексій Володимирович – доктор філософії, асистент, національний університет «Одеська політехніка», Одеса, email: v.v.vychuzhanin@op.edu.ua

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-18-30>

УДК 004.89 : 004.738.5 : 658.8

НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ІТ-ПОСЛУГАМИ

Погорєловська І.Д., Бур'ян С.С.

DIRECTIONS FOR OPTIMIZING IT SERVICE MANAGEMENT PROCESSES

Pogorielovska I.D., Burian S.S.

Розглянуто стандарти, методології та практики служб технічної підтримки. Проаналізовано проблеми ефективності традиційних каналів технічної підтримки у сучасних компаніях, запропоновано інноваційне гібридне рішення на основі інтеграції Telegram Bot з Jira Service Desk. Висвітлено архітектурні рішення, алгоритми роботи системи та особливості реалізації онлайн-взаємодії між користувачами та спеціалістами служби підтримки. Розроблено триступеневу архітектуру безпеки з розділенням на зони Інтернет, демілітаризовану зону та внутрішню корпоративну мережу. Запропоновано алгоритми авторизації, розподілу заявок та обробки онлайн-сесій з урахуванням навантаження спеціалістів та багатокритеріального підходу. Спроектвана база даних з мінімальним набором інформації без конфіденційних бізнес-даних, що відповідає сучасним принципам інформаційної безпеки, та забезпечує швидкий доступ до необхідної інформації. Використано механізми кешування для зменшення навантаження на внутрішні системи та підвищення загальної продуктивності рішення. Запропонований механізм онлайн-консультацій перетворює традиційну асинхронну систему управління заявками в інструмент оперативної взаємодії в режимі реального часу, що критично важливо в умовах віддаленої роботи. Можливість миттєво зв'язатися зі спеціалістом та вирішити проблему в режимі живого діалогу значно підвищує ефективність технічної підтримки та задоволеність користувачів. Практична цінність розробленої системи полягає в можливості її впровадження в організаціях різного розміру та профілю діяльності. Розроблена система є масштабованою, безпечною та забезпечує всі необхідні можливості для ефективної організації технічної підтримки користувачів. Особливо актуальним це рішення є для українських компаній в контексті сучасних реалій

віддаленої роботи та необхідності забезпечення безперервності бізнес-процесів.

Ключові слова: управління ІТ-послугами, інтеграція систем, архітектура програмного забезпечення, Telegram Bot API, Jira Service Desk Telegram Bot API, Jira Service Desk

Вступ. В умовах інтенсивної цифровізації бізнес-процесів якісне управління ІТ-послугами в компанії відіграє все більш важливе значення і стає стратегічним активом. Основне завдання такого управління – надання якісних сервісів для збереження стійкості та розвитку бізнесу з використанням ІТ.

Оптимальне управління ІТ-послугами (ITSM) досягається, серед іншого, за рахунок вибору відповідних визначень процесів, стандартів процесів та програмного забезпечення, залежно від рівня формалізованості та регламентованості бізнес-процесів компанії. Водночас, в умовах інтенсивного розвитку ринкових відносин та зростання інновацій у галузі інформаційних технологій, управління ІТ-послугами як циклічна і безперервна діяльність, потребує постійного пошуку оптимальних підходів та засобів ефективного управління, що і зумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Про існування комплексу невирішених проблем, пов'язаних з технічною підтримкою користувачів корпоративних інформаційних систем свідчать результати досліджень, що висвітлені в роботах як вітчизняних так і зарубіжних вчених. Зокрема, у роботі [1, с.63] висвітлені проблеми, які пов'язані з

функціонуванням служби підтримки у закладах освіти, що зумовлені як складною інфраструктурою закладів так і непрогнозованою завантаженістю їхньої служби підтримки. Автори наголошують на необхідності запровадження систем HelpDesk, вказують на необхідність “зручного та зрозумілого для користувачів механізму, що дозволить направляти запити на сайт”, але не уточнюють, який саме спосіб взаємодії з цими системами є найкращим.

У дослідженні [2], також наголошено, що стан IT-інфраструктури у багатьох університетах є незадовільним, оскільки з її допомогою неможливо надавати якісні IT-послуги, що відповідають сучасним вимогам, і з гарантованою якістю, відповідно до стандартів та рекомендацій у галузі управління IT (ITIL, MOF, COBIT тощо).

Про необхідність безперервного, постійного удосконалення процесу технічної підтримки користувачів інформаційних систем банку зазначено у роботі [3]. Важливість *технологічної підтримки інформаційної інфраструктури Міністерства оборони України обґрунтована у роботі [4].*

Водночас, проведений аналіз свідчить, що існує достатньо велика кількість стандартів, методологій та практик організації ефективної роботи служб технічної підтримки, зокрема:

- ITIL (Information Technology Infrastructure Library) - комплексний набір практик і вказівок, які спрямовані на підвищення якості та ефективності IT-послуг в організаціях, узгодження IT-послуг з бізнес-стратегією організації [5]. Це гнучкий фреймворк, що охоплює процеси планування, надання, підтримки та постійного вдосконалення IT-послуг. Саме ITIL визначає технічну підтримку не як допоміжний процес, а як важливий елемент бізнесу.

- ISO/IEC 20000 - стандарт, що визначає вимоги до планування, створення, впровадження, експлуатації, моніторингу, перегляду та вдосконалення систем керування послугами [6]. Варто зазначити, що стандартизоване управління IT-сервісами є підґрунтям забезпечення якісних IT-послуг.

- COBIT (Control Objectives for Information and Related Technology) - рамкова система для гнучкого управління корпоративними IT, узгодження IT-стратегій з бізнес-цілями, інтеграції з іншими стандартами, такими як ISO та ITIL [7].

У системному огляді [8] зазначено, що більшість організацій започатковують ITSM на основі ITIL, проте існують й інші фреймворки, такі як Microsoft MOF, IBM ITPM та HP ITSM. Методологія MOF (Microsoft Operations Framework) є результатом адаптації ITIL до власних технологій компанії Microsoft [9]. Ця сукупність принципів та моделей спрямована на вдосконалення процесів керування операціями створення та підтримки надійних і економічно ефективних IT-послуг на базі продуктів Microsoft протягом усього їхнього життєвого циклу. IBM iTPM (Information Technology Portfolio Management) — це стратегія та набір інструментів від IBM, що орієнтовані на ефективне управління IT-портфелем компанії шляхом оптимізації витрат, підвищення цінності бізнесу та зниження ризиків [10]. Така стратегія допомагає організаціям узгоджувати свої технологічні інвестиції з бізнес-цілями, забезпечуючи прозорість та контроль над усіма IT-активами та проектами.

Також популярними в системах ITSM є **фреймворки:**

- CMMI (Capability Maturity Model Integration) - інтегрована модель, що визначає структурований підхід до управління та оцінювання процесів [11]. Використання цієї моделі дозволяє досягати вищих рівнів зрілості, підвищуючи ефективність результатів та знижуючи ризики, що, у свою чергу, сприяє розробці високоякісних продуктів та послуг.

- Six Sigma – методологія, що забезпечує структурований та систематичний спосіб виявлення, аналізу та усунення дефектів процесів, покращення якості, ефективності та задоволеності клієнтів (3,4 дефекти на мільйон можливостей) своїх послуг і продуктів, знизити витрати та підвищити задоволеність клієнтів [12]. Використовуючи методології та інструменти Six Sigma IT-компанії можуть покращити якість ITSM.

- eTOM (Enhanced Telecom Operations Map) – розширена карта телекомунікаційних операцій, що визначає загальну структуру телекомунікаційних бізнес-процесів, яка охоплює всі функції, необхідні для ефективного ведення телекомунікаційного бізнесу. Вона гарантує, що різні відділи та команди в телекомунікаційній організації узгоджені щодо своїх цілей, процесів та завдань, сприяючи спільному підходу до надання послуг [13]. Саме ця модель бізнес-процесів розглядається як важлива складова IT-інфраструктури Індустрії 4.0 у роботі [14, с. 88].

Про доцільність застосування фреймворку TOGAF для побудови корпоративної IT-архітектури, що узгоджується з бізнес-стратегією, та мови моделювання ArchiMate, яка дозволяє візуалізувати і синхронізувати всі складові цієї архітектури зазначено у роботі [15]. Там же підкреслено, що разом ці інструменти сприяють усуненню неузгодженостей, підвищенню ефективності та забезпеченню безперервного розвитку IT-архітектури.

Отже, структурований і методологічний виклад змісту розглянутих документів може бути основою для організації та забезпечення ефективного функціонування IT-відділів, підвищення їх здатності надавати якісні послуги, що сприятиме оперативному вирішенню проблем корпоративних користувачів, стабільному розвитку IT-інфраструктури та, у цілому, досягненню визначених бізнес-цілей компаній.

Крім того, є достатньо детальні огляди характеристик HelpDesk систем, які допомагають надавати ефективну, масштабовану та якісну підтримку користувачам корпоративних інформаційних систем, наприклад [16]. З різноманіття інструментів для підтримки взаємодії з клієнтами, компанії можуть обирати рішення, що відповідають їхнім потребам — платформи для онлайн спілкування, системи управління заявками, бази знань, підтримка в соціальних мережах та інструменти автоматизації.

Однак, на практиці, такі системи не завжди відповідають очікуванням через складність інтерфейсів, повільність обробки звернень та фрагментацію каналів комунікації. Крім того, більшість HelpDesk систем вимагають від користувача реєстрації на спеціальному порталі, запам'ятовування логін-пароля, заповнення складних форм з безліччю обов'язкових полів. Це створює певний психологічний бар'єр, оскільки простіше підійти до колеги з IT-відділу або навіть змиритися з ситуацією. Крім того, електронна пошта, як засіб комунікації, є "важким інтерфейсом", так як створює надлишкову інформацію в системі [17] і катастрофічно повільною для критичних ситуацій. Телефонна підтримка здається швидшим рішенням, але не залишає задокументованої історії. Корпоративні чати є зручним, але в них відсутні формалізація процесів, контроль виконання, аналітичні можливості [18].

Отже, результати аналізу сучасних досліджень і публікацій та власний досвід підтверджують, що для ефективного управління IT-послугами, служба підтримки, згідно з вимогами ІТІЛ, повинна бути єдиною точкою контакту для запитів на обслуговування та вирішення інцидентів. Тому важливо мати надійні, сучасні засоби комунікації з користувачами, які зможуть забезпечити швидкий та зручний спосіб подачі звернення, його автоматичну фіксацію, структурування та передачу фахівцю.

Метою роботи є обґрунтування необхідності та розробка архітектури інтегрованої системи технічної підтримки, яка поєднує зручність популярного месенджера Telegram з потужністю професійної системи управління заявками Jira Service Desk, що забезпечить можливість як оперативного спілкування між користувачами та спеціалістами, так і оперативної обробки заявок на обслуговування.

Виклад основного матеріалу. Одним із варіантів вирішення проблеми ефективного управління IT-послугами є інтегрована система технічної підтримки, в якій усунено основний недолік тикет-систем — незручність для користувачів, але збережені при цьому всі переваги формалізованих процесів.

Ключовою ідеєю такого рішення стала розробка Telegram-бота як фронтенду для Jira Service Desk, де користувач працює, виключно, у звичному месенджері, а вся бізнес-логіка та збереження даних відбуваються у професійній системі.

Методологія ІТІЛ, яка є міжнародним стандартом управління IT-сервісами, підкреслює важливість надання зручних каналів комунікації для користувачів при збереженні контролю та документування всіх звернень [5]. Саме досягнення балансу між зручністю та контролем було метою розробки інтегрованої системи.

Технічні можливості платформ для інтеграції. Telegram з його понад 700 мільйонами активних користувачів по всьому світу є ідеальною платформою для інтеграції. На відміну від корпоративних месенджерів, Telegram вже встановлений на пристроях більшості користувачів, має відкрите програмне середовище для розробників та підтримує розширені можливості для створення автоматизованих ботів. В Україні Telegram є одним з найпопулярніших месенджерів, що зумовлює його вибір для корпоративних рішень.

Серед опитаних українців, 81% користуються Telegram для спілкування, а 73% – для отримання новин [19].

Telegram Bot API надає потужний інструментарій для створення автоматизованих систем взаємодії з користувачами. Всі запити до серверів Telegram здійснюються через захищене з'єднання, що гарантує конфіденційність даних [20]. Основні можливості, які можна використовувати для системи технічної підтримки, включають: отримання повідомлень від користувачів, відправку текстових та медіафайлів, створення інтерактивних кнопок для швидкого вибору, редагування раніше відправлених повідомлень. Telegram також підтримує завантаження файлів розміром до 50 мегабайт, що достатньо для більшості випадків технічної підтримки – користувачі можуть надсилати скріншоти, логи помилок та інші документи безпосередньо через бот [21].

Jira Service Management є однією з найпотужніших платформ для управління IT-сервісами. Система пропонує розвинені можливості для програмної інтеграції через спеціальний програмний інтерфейс, який дозволяє зовнішнім додаткам створювати заявки, отримувати інформацію про їх статус, додавати коментарі та виконувати інші операції. Типовий процес обробки заявки технічної підтримки включає такі етапи: нова заявка, взята в роботу, очікування відповіді від користувача,

очікування дій від спеціалістів, проблема вирішена, заявка закрита. Кожен перехід між етапами можна налаштувати з урахуванням специфіки компанії, додавати автоматичні перевірки та дії. [22]. Гнучка система налаштування робочих процесів є однією з найсильніших сторін Jira, що дає змогу адаптувати систему під свої специфічні потреби та інтегрувати її з іншими корпоративними системами.

Розроблена архітектура системи. У процесі дослідження була розроблена триступенева архітектура системи з розділенням на зони відповідно до принципів інформаційної безпеки (рис.1). Така архітектура забезпечує баланс між зручністю використання, продуктивністю та безпекою даних, що особливо важливо в контексті сучасних кіберзагроз, які детально висвітлені у роботі [23, с. 841-865.].

Перший рівень – це зона Інтернет, в якій знаходяться кінцеві користувачі з додатками Telegram на своїх пристроях. Ця зона повністю ізольована від внутрішніх компонент системи і має доступ лише до другого рівня через зашифроване з'єднання. Навіть якщо пристрій користувача буде зламано, зломисник не зможе отримати прямий доступ до внутрішніх систем компанії.

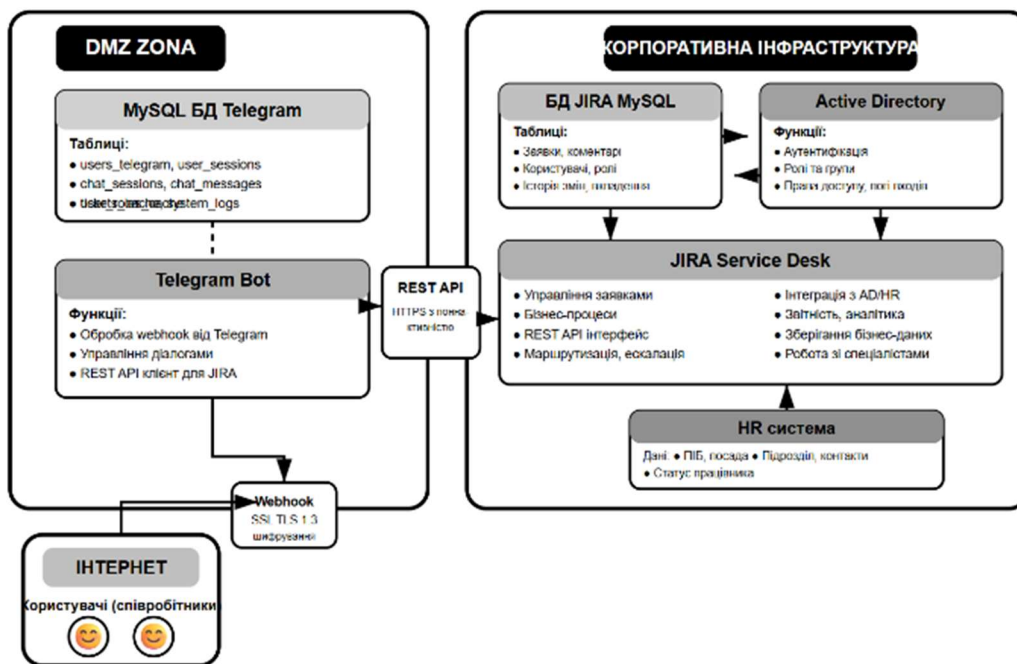


Рис. 1. Триступенева архітектура системи з розділенням на зони відповідно до принципів інформаційної безпеки (розроблено автором)

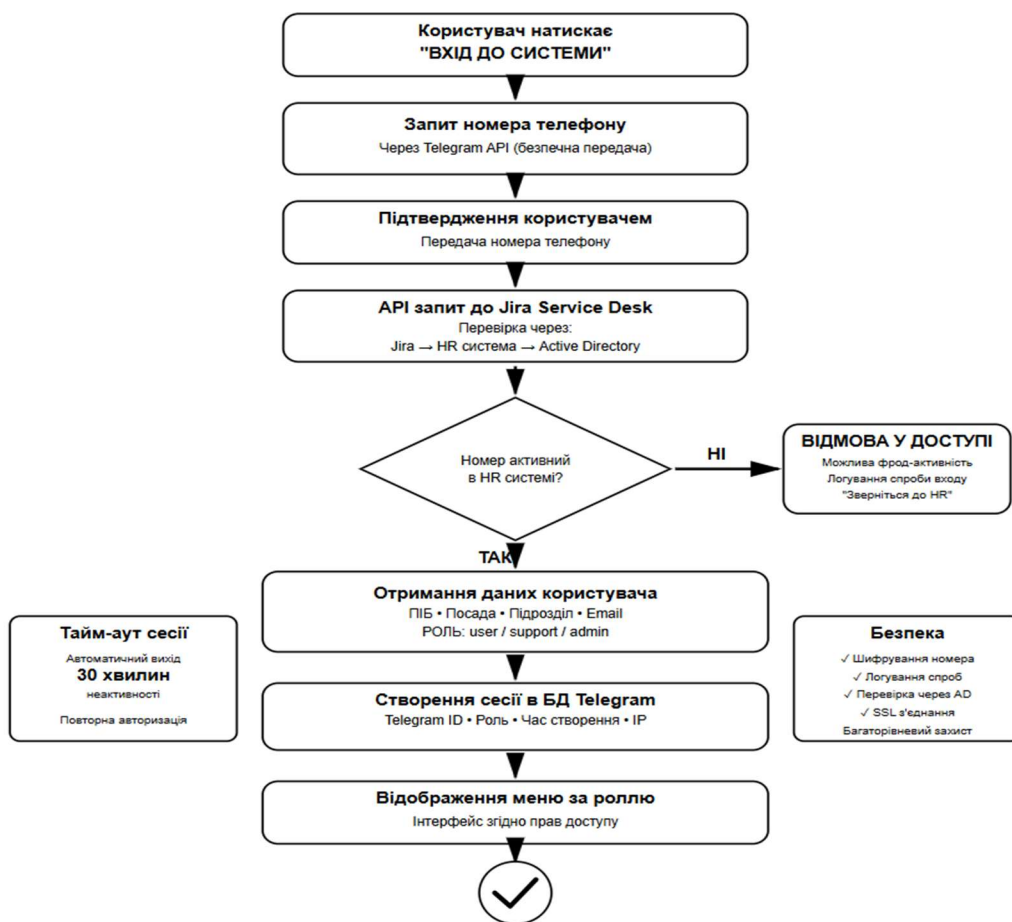


Рис. 2. Алгоритм авторизації користувачів в системі (розроблено автором)

Другий рівень – демілітаризована зона, яка є буферною зоною між Інтернетом та внутрішньою мережею. Тут розміщені два ключові компоненти: серверний додаток Telegram Bot, який обробляє повідомлення користувачів та управляє інтерфейсом, та база даних для зберігання тимчасової інформації – активних сесій користувачів, історії онлайн-чатів, системних логів. Важливо підкреслити, що конфіденційна бізнес-інформація у цій зоні не зберігається.

Третій рівень – внутрішня корпоративна мережа, де розміщені критичні системи організації: Jira Service Desk з базою даних заявок, система управління користувачами Active Directory, HR система з інформацією про співробітників. Telegram Bot не має прямого доступу до цих систем – вся взаємодія відбувається виключно через програмний інтерфейс Jira, що є єдиною контрольованою точкою входу.

Типовий процес обробки запиту користувача виглядає наступним чином. Користувач надсилає повідомлення в Telegram, яке через зашифроване з'єднання надходить до бота в демілітаризованій зоні. Бот перевіряє, чи активна сесія користувача, формує запит до Jira у внутрішній мережі. Jira виконує необхідні дії, звертаючись при потребі до системи управління користувачами або HR системи, повертає результат боту, який формує зрозумілу відповідь користувачу.

Алгоритм авторизації користувачів. Розроблений алгоритм авторизації забезпечує надійну ідентифікацію користувачів на основі їхнього номера телефону. При першому запуску бота користувач бачить привітальне повідомлення та кнопку для початку процесу входу в систему (рис. 2). Бот запитує номер телефону через вбудований механізм Telegram, який дозволяє користувачу поділитися своїм номером одним натисканням без необхідності вводити його вручну. Це не лише зручно для

користувача, але й безпечно, оскільки виключена можливість помилки при введенні або спроби використати чужий номер телефону.

Після отримання номера бот надсилає запит до HR системи через програмний інтерфейс Jira для перевірки, чи є цей номер телефону в корпоративній базі співробітників. Якщо номер не знайдено, система відмовляє в доступі та обов'язково фіксує цю спробу в журналі безпеки для можливого розслідування. Якщо ж номер підтверджено, система отримує повну інформацію про користувача: повне ім'я, посаду, відділ, роль в системі технічної підтримки.

Після успішної верифікації створюється сесія користувача, яка зберігає інформацію про його ідентифікатор в Telegram, присвоєну роль, час початку сесії та час останньої активності. Система відображає меню відповідно до ролі користувача – звичайні користувачі бачать можливість створити заявку або переглянути

свої заявки, спеціалісти підтримки отримують доступ до списку призначених їм заявок та можливості приймати запити на онлайн-консультації.

Критично важливим елементом безпеки є автоматичне завершення сесії через тридцять хвилин неактивності. При кожній дії користувача система перевіряє, коли була остання активність, і якщо минуло більше встановленого часу, вимагає повторної авторизації. Це запобігає несанкціонованому доступу у випадку, якщо користувач залишив пристрій без нагляду або втратив його.

Алгоритм розподілу заявок між спеціалістами. Ефективний розподіл заявок є ключовим фактором продуктивності служби підтримки. Тому було розроблено алгоритм, який забезпечує справедливий та оптимальний розподіл навантаження між всіма доступними спеціалістами (рис. 3).

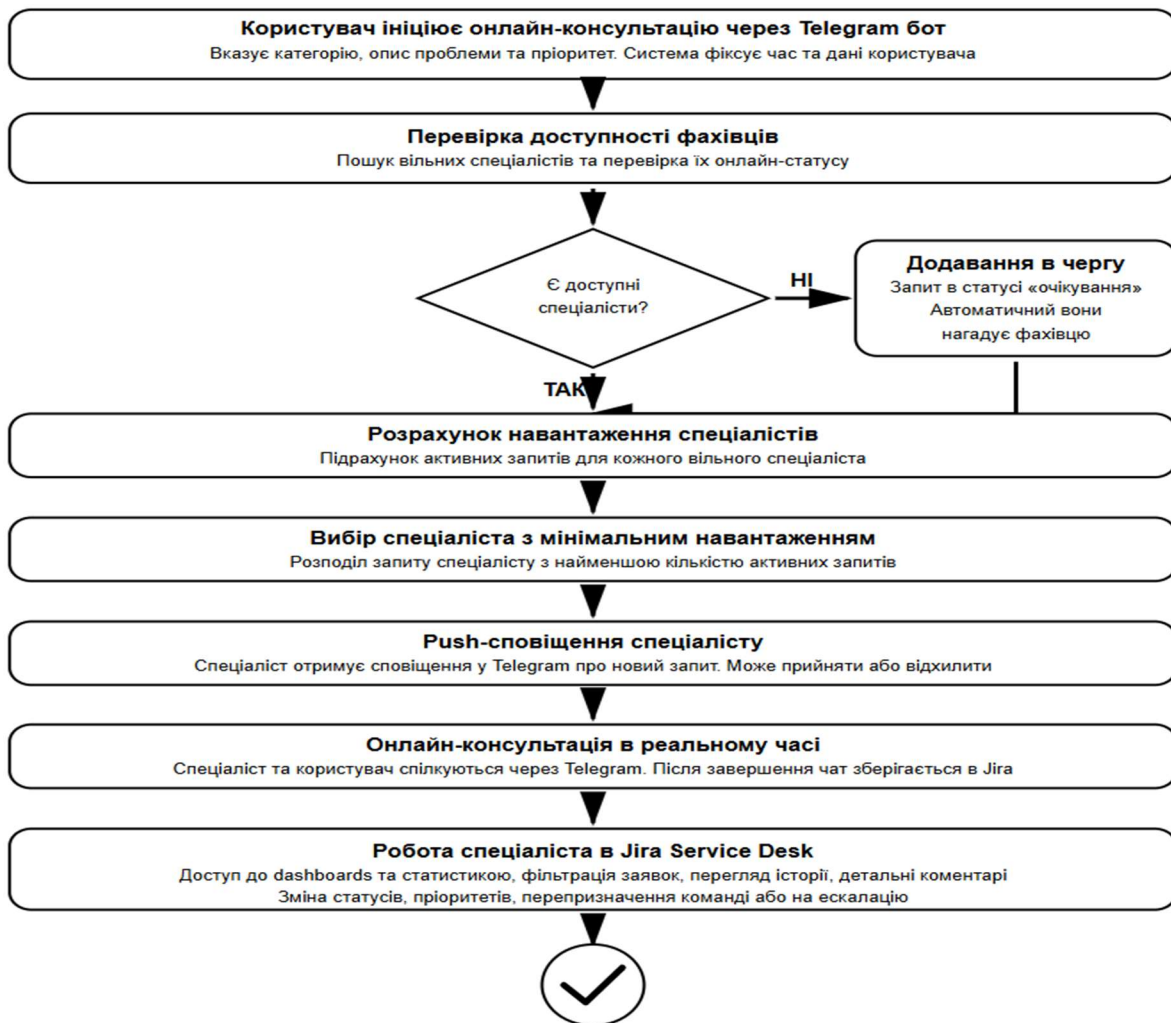


Рис. 3. Алгоритм розподілу заявок між спеціалістами служби підтримки (розроблено автором)

У разі, коли користувач створює заявку через Telegram Bot, він самостійно заповнює всю необхідну інформацію: обирає тип проблеми з підготовленого переліку категорій, встановлює пріоритет заявки (критичний, високий, середній, низький), вказує детальний опис проблеми, може прикріпити скріншоти або інші файли для кращого розуміння ситуації. Після заповнення всіх полів система автоматично створює заявку в Jira Service Desk через програмний інтерфейс та присвоює їй унікальний номер для відстеження.

Одразу після створення заявки система запускає процес автоматичного розподілу. Важливо підкреслити, що всі спеціалісти технічної підтримки приймають в роботу проблеми будь якої складності, а вже за потреби вирішення проблеми на вищому рівні, передають колегам вищої компетенції – система не враховує спеціалізацію чи компетенції при розподілі заявок.

Алгоритм розподілу базується на трьох основних показниках для кожного спеціаліста. По-перше, це поточне навантаження – кількість активних заявок, які зараз знаходяться в роботі у спеціаліста в статусах "нова", "в роботі" та "очікує відповіді користувача". По-друге, система враховує час закриття останньої заявки – це дозволяє більш рівномірно розподіляти нові звернення між спеціалістами, які тільки завершили роботу над попередньою задачею. По-третє, враховується загальна кількість закритих заявок за поточний період – це забезпечує баланс навантаження в довгостроковій перспективі.

Система розраховує інтегральний показник доступності для кожного спеціаліста, який комбінує всі три метрики. Заявка автоматично призначається спеціалісту з найкращим показником доступності – тобто тому, хто має найменше активних заявок, давно завершив попередню роботу та має меншу загальну кількість закритих заявок за період. Обраний спеціаліст миттєво отримує сповіщення в Telegram з базовою інформацією про нову заявку: номер, пріоритет, короткий опис проблеми та можливість відразу перейти до детального перегляду в Jira.

При розробці алгоритму навантаження на спеціалістів служби технічної підтримки був врахований збалансований підхід, про важливість якого наголошено у праці [24]. Саме цей підхід дозволяє системі забезпечувати справедливий розподіл навантаження між всіма членами команди технічної підтримки.

Механізм онлайн-консультацій. Найбільш інноваційною частиною розробленої системи є механізм онлайн-консультацій у реальному часі. На відміну від традиційного підходу систем управління заявками, де вся комунікація відбувається асинхронно через коментарі до заявки, цей механізм дозволяє користувачу миттєво зв'язатися зі спеціалістом для оперативного вирішення проблеми (див. рис. 3). Процес починається з того, що користувач створює заявку через Telegram Bot, заповнюючи всю необхідну інформацію: тип проблеми, пріоритет, детальний опис. Після створення заявки користувач може натиснути кнопку "Зв'язатися зі спеціалістом онлайн", якщо проблема потребує термінового вирішення або детального обговорення в режимі діалогу. У разі, коли користувач ініціює запит на онлайн-консультацію, система перевіряє доступність спеціалістів технічної підтримки. Якщо є вільні спеціалісти, система запускає той самий алгоритм розподілу, що використовується для звичайних заявок. Система аналізує три ключові показники для кожного доступного спеціаліста: поточне навантаження активними заявками, час закриття останньої заявки та загальну кількість закритих заявок за період.

На основі цих показників система розраховує інтегральний коефіцієнт навантаження та обирає оптимального спеціаліста – того, хто має найменше поточних задач, нещодавно завершив попередню роботу і має загалом менше закритих заявок. Обраний спеціаліст отримує сповіщення в Telegram про запит на онлайн-консультацію з інформацією про заявку та користувача. Він може прийняти запит одним натисканням кнопки, після чого встановлюється прямий зв'язок між користувачем та спеціалістом через бот.

Особливо важливою є ситуація, коли всі спеціалісти зайняті іншими консультаціями або активними заявками. У такому випадку запит на онлайн-консультацію автоматично переходить у статус очікування, і користувач отримує відповідне повідомлення з приблизним часом очікування. Система фіксує час створення запиту та його пріоритет для подальшої обробки.

Коли один зі спеціалістів завершує роботу над поточною заявкою або онлайн-консультацією, система автоматично перевіряє наявність запитів у черзі очікування. Якщо такі запити є, система запускає алгоритм розподілу серед всіх спеціалістів, які щойно звільнилися або мають найменше навантаження. Запити з

черги обробляються з урахуванням їхнього пріоритету та часу очікування – критичні та більш старі запити отримують вищий пріоритет при розподілі.

З моменту встановлення зв'язку всі повідомлення, які користувач надсилає боту, автоматично передаються призначеному спеціалісту, і навпаки – відповіді спеціаліста миттєво доставляються користувачу. Система створює окрему сесію чату, яка зберігає інформацію про обох учасників розмови та номер відповідної заявки в Jira.

Всі повідомлення в онлайн-чаті подвійно зберігаються: тимчасово в базі даних Telegram, для швидкого відображення, та паралельно додаються як коментарі до заявки в Jira через програмний інтерфейс. Це забезпечує повну документацію спілкування для подальшого аналізу та звітності. Сесія онлайн-консультації завершується або вручну, коли будь-який з учасників натискає кнопку завершення розмови, або автоматично після десяти хвилин без повідомлень.

Після завершення консультації вся історія чату остаточно синхронізується з Jira, статус спеціаліста змінюється на "вільний", і система автоматично перевіряє наявність нових запитів у черзі очікування. Користувач може оцінити якість консультації за простою шкалою від одного до п'яти балів, що допомагає відстежувати ефективність роботи команди підтримки.

Цей механізм принципово змінює підхід до технічної підтримки, перетворюючи традиційну систему управління заявками в інструмент для оперативної взаємодії. Це критично важливо в сучасних умовах, особливо коли спеціалісти можуть працювати віддалено з різних локацій. Онлайн-консультації дозволяють значно скоротити час вирішення проблем, покращити якість діагностики завдяки можливості ставити уточнюючі питання в режимі реального часу, та підвищити загальну задоволеність користувачів якістю обслуговування.

Організація бази даних. Для забезпечення швидкодії та надійності функціонування системи була спроектована база даних, яка зберігає необхідну інформацію для роботи Telegram Bot. Ключовим принципом проектування було збереження мінімального набору даних без конфіденційної бізнес-інформації, яка залишається виключно у внутрішній корпоративній мережі.

База даних складається з семи основних таблиць, які забезпечують різні аспекти функціонування системи (рис. 4). Таблиця USERS_TELEGRAM призначена для зберігання інформації про користувачів: їхній унікальний ідентифікатор в Telegram, зашифрований номер телефону для додаткової безпеки, посилання на профіль користувача в Jira, присвоєну роль в системі, дату створення акаунту та час останнього входу.

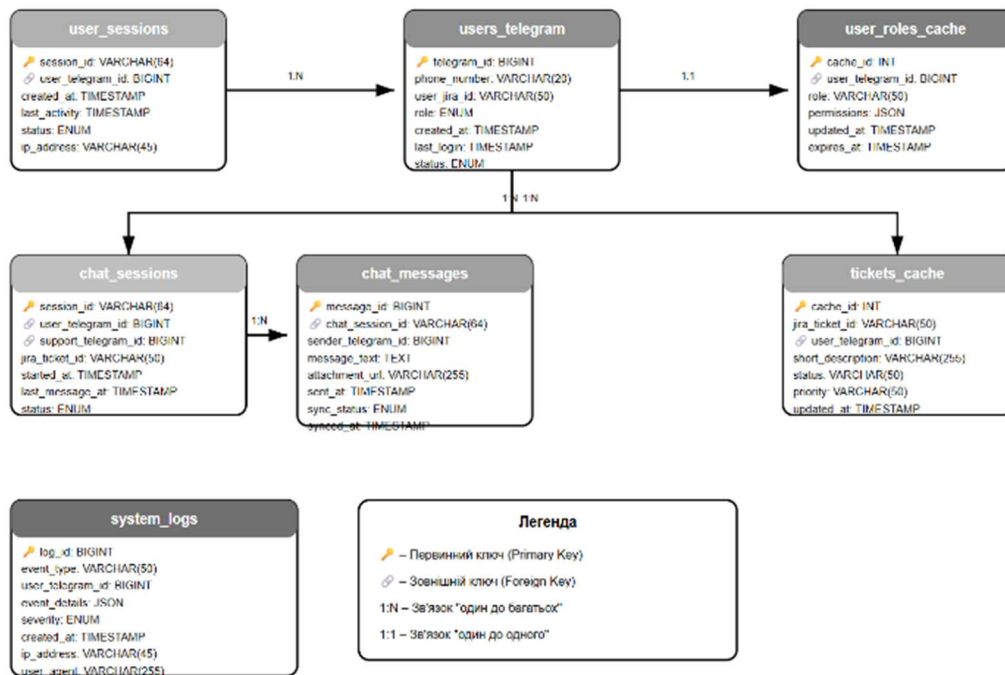


Рис. 4. Схема бази даних системи (розроблено автором)

Таблиця `USER_SESSIONS` керує активними сесіями користувачів, зберігаючи час створення сесії, час останньої активності та поточний статус. Саме ця таблиця дозволяє реалізувати механізм автоматичного завершення сесій після періоду неактивності. Для оптимізації продуктивності та зменшення кількості запитів до внутрішніх систем організації, система використовує таблицю кешу `USER_ROLES_CACHE`, яка тимчасово зберігає інформацію про ролі та дозволи користувачів.

Для забезпечення роботи механізму онлайн-консультацій передбачено дві спеціалізовані таблиці. Таблиця `CHAT_SESSIONS` зберігає інформацію про активні сесії чатів: учасників розмови, номер відповідної заявки, час початку та статус сесії. Таблиця `CHAT_MESSAGES` містить історію всіх повідомлень в онлайн-чатах з інформацією про відправника, текст повідомлення, вкладені файли та статус синхронізації з Jira.

Додатково база даних містить таблицю кешу заявок `TICKETS_CACHE`, яка дозволяє швидко відображати список заявок користувача без постійних звернень до Jira. У ній зберігається лише базова інформація: номер заявки, короткий опис проблеми, поточний статус, пріоритет та час створення.

Таблиця `SYSTEM_LOG` – це системний журнал, у якому фіксуються всі важливі події, що відбуваються в системі: спроби авторизації, створення заявок, помилки при роботі з програмними інтерфейсами, початок та завершення онлайн-чатів.

Важливо підкреслити, що розроблена база даних є лише допоміжним сховищем для забезпечення швидкої роботи бота. Всі конфіденційні бізнес-дані – детальні описи проблем, історія обробки заявок, коментарі спеціалістів, вкладені файли з можливою чутливою інформацією – зберігаються виключно у внутрішній корпоративній мережі в базі даних Jira Service Desk. Персональні дані в базі Telegram зберігаються в зашифрованому вигляді відповідно до вимог чинного законодавства про захист персональних даних.

При розробці бази даних були враховані вимоги, визначені у [25], щодо важливості правильного розділення даних між різними сховищами з урахуванням їхньої критичності та вимог до швидкості доступу. Саме такий підхід забезпечує баланс між продуктивністю системи та безпекою даних.

Протоколи взаємодії та забезпечення безпеки. Для взаємодії між компонентами системи використовуються сучасні протоколи та методи комунікації. Основою є REST підхід, сутність якого розкрито в дослідженнях [26] та, який забезпечує простоту та надійність обміну даними між Telegram Bot та Jira Service Desk.

Для забезпечення роботи в реальному часі система використовує механізм вебхуків – спеціальних повідомлень про події. Коли в Jira відбувається важлива подія – створення нової заявки, зміна статусу, додавання коментаря – система автоматично надсилає повідомлення боту. Аналогічно Telegram використовує вебхуки для миттєвої доставки повідомлень від користувачів до бота. Це дозволяє скоротити затримку з тридцяти-шістдесяти секунд при традиційному підході до одної-двох секунд.

Безпека забезпечується на декількох рівнях одночасно. Всі з'єднання між компонентами системи використовують сучасні протоколи шифрування, які гарантують конфіденційність та цілісність даних при передачі. Спеціальні ключі доступу до програмних інтерфейсів регулярно оновлюються для мінімізації ризиків компрометації. Система має вбудований механізм обмеження кількості запитів – максимум тридцять запитів на секунду від одного користувача, що захищає від атак типу "відмова в обслуговуванні".

Всі вхідні дані проходять обов'язкову перевірку та очищення для захисту від спроб впровадження шкідливого коду. Ведеться повний журнал аудиту всіх операцій в системі, що дозволяє відстежити будь-які підозрілі дії та провести розслідування інцидентів безпеки. Особливу увагу приділено захисту персональних даних відповідно до європейських стандартів GDPR та українського законодавства, що особливо важливо в умовах зростання кіберзагроз. Розроблена система враховує сучасні вимоги до безпеки на всіх рівнях архітектури.

Переваги інтегрованого підходу. Комплексний підхід до розробки архітектури інтегрованої системи технічної підтримки, про важливість застосування якого при розробці складних систем, наголошено у роботі [27], дозволив урахувати потреби всіх зацікавлених сторін. Створена система поєднала кращі властивості двох технологій – зручність популярного месенджера та потужність професійної системи управління заявками. Користувачі отримали можливість оперативно формувати та надсилати заявку, не виходячи з

месенджера, який вже встановлений на їхніх пристроях. При цьому не потрібно пам'ятати адреси корпоративних порталів, логіни та паролі до них, шукати потрібні розділи у складних меню.

Механізм онлайн-консультацій дозволяє користувачам отримати миттєву допомогу у критичних ситуаціях, не очікуючи на відповідь електронною поштою чи в черзі на телефонній лінії. Проблеми можуть вирішуватися в режимі живого діалогу, що особливо є цінним для нетехнічних користувачів, яким іноді складно детально сформулювати проблему в письмовій формі, - в розмові уточнюючі запитання спеціаліста дозволяють швидко з'ясувати суть проблеми.

Для спеціалістів технічної підтримки система забезпечує зручний інструмент оперативної комунікації через Telegram при збереженні всіх переваг професійної системи Jira. Вони отримують миттєві сповіщення про нові заявки прямо в месенджер, можуть швидко переглянути базову інформацію, і за потреби перейти до повнофункціонального інтерфейсу Jira. Історія всіх онлайн-консультацій автоматично зберігається в системі, що важливо для подальшого аналізу та формування висновків та звітів.

Для керівництва служби підтримки та адміністраторів системи основною перевагою є повна прозорість всіх процесів. Кожне звернення фіксується, кожна дія документується, накопичується статистика для аналізу. Відомо про кількість заявок, що обробляється щодня, які категорії проблем є найпоширенішими, як швидко спеціалісти реагують на звернення, наскільки користувачі задоволені якістю обслуговування. Ці дані дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації служби підтримки, розподілу ресурсів та навчання персоналу.

У дослідженнях систем штучного інтелекту відзначають, що збір та аналіз великих обсягів структурованих даних про роботу служби підтримки створює основу для впровадження інтелектуальних систем в майбутньому [28]. Наприклад, система може навчитися автоматично пропонувати рішення типових проблем або передбачати потенційні проблеми до їх виникнення. Це визначає наступний етап розвитку розробленої інтегрованої системи.

Розроблена система має значний практичний потенціал для українських компаній різного розміру. Для малих та середніх компаній вона дозволяє організувати професійну технічну

підтримку без великих інвестицій в складну інфраструктуру. Telegram є безкоштовним месенджером, Jira Service Management має доступні тарифні плани для невеликих команд, а розробка самого бота не вимагає значних ресурсів завдяки добре документованому програмному інтерфейсу.

Особливо актуальною система є в контексті сучасних умов роботи в Україні. Віддалена робота стала нормою для багатьох компаній і традиційні методи технічної підтримки вже не працюють. Telegram Bot дозволяє організувати ефективну підтримку незалежно від того, де фізично знаходяться користувачі та спеціалісти.

Висновки. Результати проведеного дослідження свідчать про існування комплексу невирішених проблем, пов'язаних з технічною підтримкою користувачів корпоративних інформаційних систем. Водночас, запровадження в практику використання стандартів, методологій (ITIL, COBIT, ISO/IEC 20000 інш.) та сучасних систем автоматизації ITSM сприяє їх ефективному вирішенню.

Розроблена інтегрована система технічної підтримки на базі Telegram Bot та Jira Service Desk успішно поєднала зручність популярного месенджера з потужністю професійної систем управління заявками. Триступенева архітектура системи з розподілом на зони Інтернет, демілітаризовану зону та внутрішню корпоративну мережу забезпечує високий рівень інформаційної безпеки навіть при використанні публічного месенджера. Компрометація будь-якого рівня не надає доступу до критичних систем організації завдяки принципу ізоляції та єдиній контрольованій точці входу через програмний інтерфейс Jira.

Розроблені алгоритми авторизації на основі номера телефону з верифікацією через HR систему, автоматичного розподілу заявок з урахуванням навантаження спеціалістів та багатокритеріального підходу, обробки онлайн-сесій в реальному часі дозволяють значно оптимізувати процеси технічної підтримки. Система забезпечує баланс між швидкістю реагування та якістю документування всіх звернень.

Найбільш інноваційним аспектом розробленої системи є механізм онлайн-консультацій, який перетворює традиційну асинхронну систему управління заявками в інструмент оперативної взаємодії в режимі реального часу. Це критично важливо в сучасних умовах віддаленої роботи, коли

спеціалісти та користувачі можуть знаходитися в різних локаціях. Можливість миттєво зв'язатися зі спеціалістом та вирішити проблему в режимі живого діалогу значно підвищує ефективність технічної підтримки та задоволеність користувачів.

Спроектвана база даних з мінімальним набором інформації без конфіденційних бізнес-даних відповідає сучасним принципам інформаційної безпеки та забезпечує швидкий доступ до необхідної інформації. Використання механізмів кешування дозволяє зменшити навантаження на внутрішні системи організації та підвищити загальну продуктивність даного рішення.

Практична цінність розробленої системи полягає в можливості її впровадження в компаніях різного розміру та профілю діяльності. Розроблена система є масштабованою, безпечною та сприяє ефективній організації технічної підтримки користувачів.

Перспективні дослідження будуть спрямовані на розвиток та удосконалення системи HelpDesk за рахунок впровадження елементів штучного інтелекту для автоматичної обробки типових запитів, розробки модулів машинного навчання для прогнозування потенційних проблем, інтеграції з іншими популярними месенджерами (Viber, WhatsApp) для надання користувачам можливості вибору більш зручного каналу комунікації, впровадження аналітичних систем для виявлення закономірностей та подальшої оптимізації роботи служби технічної підтримки. Реалізація цих напрямів сприятиме, в цілому, стабільному, прогнозованому та ефективному функціонуванню корпоративної IT-інфраструктури компанії.

Література

1. Круглик В. С., Плечій О. О. Концепція організації інформаційної системи технічної підтримки // Інформаційні технології в освіті. 2012. № 12. С. 61–66.
2. Василів В. Б. Практичні підходи до формування служби технічної підтримки користувачів інформаційної системи університету // Бізнес Інформ. 2018. №4. С. 371–377.
3. Заховалко Т. В., Максишко Н. К., Олешко О. В. Аналіз та удосконалення процесу технічної підтримки користувачів інформаційних систем банку // Вісник Запорізького Національного університету. 2014. №3(14). С. 64–76.
4. Дядечко А. О., Даценко І. П., Головченко О. В. Концептуальні аспекти технологічної підтримки інформаційної інфраструктури Міністерства оборони України // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024. № 3(51). С. 96–107.
5. ITIL® and IT Service Management. URL: <http://www.itil.org.uk/> (дата звернення 10.06.2025).
6. COBIT an ISACA Framework. URL: <https://www.isaca.org/resources/cobit#1> (дата звернення 10.06.2025).
7. ISO/IEC 20000 – міжнародний стандарт для управління та обслуговування IT сервісів. URL: <https://tms.ua/iso-iec-20000/> (дата звернення 10.06.2025).
8. Iden Jon, Eikebrokk Tom Roar. Implementing IT Service Management: A systematic literature review. International Journal of Information Management. Volume 33, Issue 3, June 2013, p. 512–523. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268401213000078> (дата звернення 05.09.2025).
9. Microsoft Operations Framework 4.0. URL: [https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/tn-archive/cc506049\(v=technet.10\)](https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/tn-archive/cc506049(v=technet.10)) (дата звернення 10.06.2025).
10. IT Portfolio Management (ITPM) URL: [https://cio-wiki.org/wiki/IT_Portfolio_Management_\(ITPM\)](https://cio-wiki.org/wiki/IT_Portfolio_Management_(ITPM)) (дата звернення 10.06.2025).
11. CMMIs Guide to Bridging the Strategy Execution Gap. URL: <https://cmminstitute.com/resource-files/public/cmmis-guide-to-bridging-the-strategy-execution-gap> (дата звернення 10.06.2025).
12. Rodriguez Diego. Understanding Six Sigma in the IT Industry. URL: <https://www.invensislearning.com/blog/six-sigma-it-transformation/> (дата звернення 10.06.2025).
13. E TOM: Enhanced Telecom Operation Map. URL: <https://www.scribd.com/doc/50556336/CCU-eTOM> (дата звернення 10.06.2025).
14. Довгий С. О., Копійка О. В. IT-інфраструктура як база складової цифрової трансформації. Монографія. К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. 458 с.
15. Безпечна корпоративна архітектура: TOGAF та ArchiMate для сталого зростання. URL: <https://surl.lu/vnytk> (дата звернення 10.06.2025).
16. Олешко Д. Повний гід з 25 найкращих програмних інструментів для обслуговування клієнтів. URL: <https://surl.li/spjmjb> (дата звернення 10.06.2025).
17. Bosu Michael, Abuaiadah Diab et al. Evaluation of IT Service Desk: A Case Study. URL: https://www.academia.edu/70472216/Evaluation_of_IT_Service_Desk_A_Case_Study (дата звернення 10.06.2025).
18. Бур'ян С. С., Погореловська І. Д. Інтегрована система служби технічної підтримки на основі Telegram і Jira Service Desk. Економіка і бізнес: нові реалії, технологічні тренди, цифрові

- інновації: збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених (Львів-Ірпінь, 15 травня 2025 р.). Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2025. С. 530-533.
19. Українські медіа, ставлення та довіра у 2024 р. Опитування USAID-Internews щодо споживання медіа. URL: https://drive.google.com/file/d/1kwsclr3Qm2QaqaIVv0_l4saWRFY_NXWb/view?pli=1 (дата звернення 05.09.2025).
 20. Telegram FAQ. URL: <https://telegram.org/faq> (дата звернення 23.07.2025).
 21. Telegram Bot API server. URL: <https://github.com/tldlib/telegram-bot-api> (дата звернення 23.07.2025).
 22. Atlassian Corporation. Jira REST API Documentation. URL: <https://developer.atlassian.com/cloud/jira/platform/> ((дата звернення 07.07.2025).
 23. OWASP Top 10 API Security Risks – 2023. URL: <https://owasp.org/API-Security/editions/2023/en/0x11-t10/>(дата звернення 05.09.2025).
 24. Волошин О. Ф. Моделі та методи прийняття рішень: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. /О.Ф. Волошин, С.О. Мащенко. 2-ге вид., перероб. та допов. К.: Видавничополіграфічний центр "Київський університет", 2010. 336 с.
 25. Teorey T. J., Morgan T. Et al. Database Design: Know It All. (Morgan Kaufmann Know It All) : Morgan Kaufmann, 2008. 368 p.
 26. Fielding R. T., Taylor R. N. Principled design of the modern Web architecture. In Proceedings of the 2000 International Conference on Software Engineering (ICSE 2000), Limerick, Ireland, June 2000. P. 407–416.
 27. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Основи системного аналізу. К.: ВПЦ "Київський університет", 2007. 544 с.
 28. Литвин В. В., Пасічник В. В., Яцишин А. В. Системи штучного інтелекту. Львів: "Магнолія 2006", 2017. 676 с.
- ### References
1. Kruglyk, V. S., Plechii, O. O. Kontseptsiia orhanizatsii informatsiinoi systemy tekhnichnoi pidtrymky // *Informatsiini tekhnologii v osviti*, 2012. #12. S. 61–66.
 2. Vasyliiv, V. B. Praktychni pidkhody do formuvannia sluzhby tekhnichnoi pidtrymky korystuvachiv informatsiinoi systemy universytetu // *Biznes Inform*, 2018. #4. S. 371–377.
 3. Zakhovalko, T. V., Maksyshko, N. K., & Oleshko, O. V. Analiz ta udoskonalennia protsesu tekhnichnoi pidtrymky korystuvachiv informatsiinykh system banku // *Visnyk Zaporizkoho Natsionalnoho Universytetu*, 2014. #3(14). S. 64–76.
 4. Diadechko, A. O., Datsenko, I. P., Holovchenko, O. V. Kontseptualni aspekty tekhnolohichnoi pidtrymky informatsiinoi infrastruktury Ministerstva oborony Ukrainy // *Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 2024. #3(51), S. 96–107.
 5. ITIL® and IT Service Management. URL: <http://www.itil.org.uk/> (Accessed: 10.06.2025).
 6. COBIT – an ISACA Framework. URL: <https://www.isaca.org/resources/cobit#1> (Accessed: 10.06.2025).
 7. ISO/IEC 20000 – mizhnarodnyi standart dlia upravlinnia ta obsluhovuvannia IT servisiv. URL: <https://tms.ua/iso-iec-20000/> (Accessed: 10.06.2025).
 8. Iden Jon, Eikebrokk Tom Roar. Implementing IT Service Management: A systematic literature review. International Journal of Information Management. Volume 33, Issue 3, June 2013, p. 512-523. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268401213000078> (Accessed: 05.09.2025).
 9. Microsoft Operations Framework 4.0. URL: [https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/tn-archive/cc506049\(v=technet.10\)](https://learn.microsoft.com/en-us/previous-versions/tn-archive/cc506049(v=technet.10)) (Accessed: 10.06.2025).
 10. IT Portfolio Management (ITPM). URL: [https://cio-wiki.org/wiki/IT_Portfolio_Management_\(ITPM\)](https://cio-wiki.org/wiki/IT_Portfolio_Management_(ITPM)) (Accessed: 10.06.2025).
 11. CMMI’s Guide to Bridging the Strategy Execution Gap. URL: <https://cmminstitute.com/resource-files/public/cmmis-guide-to-bridging-the-strategy-execution-gap> (Accessed: 10.06.2025).
 12. Rodriguez Diego. Understanding Six Sigma in the IT Industry. URL: <https://www.invensislearning.com/blog/six-sigma-it-transformation/> (Accessed: 10.06.2025).
 13. E TOM: Enhanced Telecom Operation Map. URL: <https://www.scribd.com/doc/50556336/CCU-eTOM> (Accessed: 10.06.2025).
 14. Dovhyi S. O., Kopyika O. V. *IT-infrastruktura yak bazova skladova tsyfrovoi transformatsii*. Monohrafiia. Kyiv: Yuston. 2023. 458 s.
 15. Bezpechna korporativna arkhitektura: TOGAF ta ArchiMate dlia staloho zrostannia. URL: <https://surl.lu/vnytyk> (Accessed: 10.06.2025).
 16. Oliieshko D. Povnyi hid z 25 naikrashchykh prohramnykh instrumentiv dlia obsluhovuvannia kliientiv. URL: <https://surl.li/spjmjb> (Accessed: 10.06.2025).
 17. Bosu Michael, Abuaiadah Diab et al. Evaluation of IT Service Desk: A Case Study. URL: https://www.academia.edu/70472216/Evaluation_of_IT_Service_Desk_A_Case_Study (Accessed: 10.06.2025).
 18. Burian S. S., Pohorielovska I. D. Intehrovana systema sluzhby tekhnichnoi pidtrymky na osnovi Telegram i Jira Service Desk. *Ekonomika i biznes: novi realii, tekhnolohichni trendy, tsyfrovi innovatsii: zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi*

- naukovo-praktychnoi konferentsii здобувачив вищої освіти та молодих вчених (Lviv–Irpin, 15 травня 2025 р.). Lviv: LNU im. Ivana Franka. 2025. S. 530–533.
19. Ukrainski media, stavlennia ta dovira u 2024 r. USAID-Internews survey. URL: https://drive.google.com/file/d/1kwsclr3Qm2QaqaIVv0I4saWRFY_NXWb/view?pli=1 (Accessed: 05.09.2025).
 20. Telegram FAQ. URL: <https://telegram.org/faq> (Accessed: 23.07.2025).
 21. Telegram Bot API Server. URL: <https://github.com/tlible/telegram-bot-api> (Accessed: 23.07.2025).
 22. Atlassian Corporation. Jira REST API Documentation. URL: <https://developer.atlassian.com/cloud/jira/platform/> (Accessed: 07.07.2025).
 23. OWASP Top 10 API Security Risks – 2023. URL: <https://owasp.org/API-Security/editions/2023/en/0x11-t10/> (Accessed: 05.09.2025).
 24. Voloshyn O. F. *Modeli ta metody pryiniattia rishen.* /O. F. Voloshyn, S. O. Mashchenko. 2-e vid., pererob. ta dopov. K.: Vidavnichopolihrafichii centr "Kyivskiy universytet", 2010. 336 s.
 25. Teorey T. J., Morgan T. Et al. Database Design: Know It All. (Morgan Kaufmann Know It All) : Morgan Kaufmann, 2008. 368 p.
 26. Fielding R. T., Taylor R. N. Principled design of the modern Web architecture. In Proceedings of the 2000 International Conference on Software Engineering (ICSE 2000), Limerick, Ireland, June 2000. P. 407–416.
 27. Zhurovskiy M. Z., Pankratova N. D. *Osnovy systemnoho analizu.* K.: Vidavnichopolihrafichii centr "Kyivskiy universytet", 2007. 544 s.
 28. Lytvyn V. V., Pasichnyk V. V., Yatsyshyn A. V. *Systemy shtuchnoho intelektu.* Lviv: "Mahnoliia 2006", 2017. 676 s.

Pogorielovska I.D., Burian S.S. Directions for optimizing IT service management processes

Standards, methodologies and practices of technical support services are considered. The problems of the efficiency of traditional technical support channels in modern companies are analyzed, an innovative hybrid solution is proposed based on the integration of Telegram Bot with Jira Service Desk. Architectural solutions, algorithms of the system operation and features of the implementation of online interaction between users and support service specialists are highlighted. A three-stage security architecture is developed with division into Internet zones, a demilitarized zone and an internal corporate network. Algorithms of authorization, distribution of applications and processing of online sessions are proposed, taking into account the workload of specialists and a multi-criteria approach. A database is designed with a minimum set of information without confidential business data, which meets modern principles of information security and provides quick access to the necessary information. Caching mechanisms are used to reduce the load on internal systems and increase the overall productivity of the solution. The proposed online consultation mechanism transforms the traditional asynchronous request management system into a tool for real-time operational interaction, which is critically important in remote work conditions. The ability to instantly contact a specialist and solve a problem in a live dialogue mode significantly increases the efficiency of technical support and user satisfaction. The practical value of the developed system lies in the possibility of its implementation in organizations of various sizes and business profiles. The developed system is scalable, secure and provides all the necessary capabilities for the effective organization of technical support for users. This solution is especially relevant for Ukrainian companies in the context of modern realities of remote work and the need to ensure the continuity of business processes.

Keywords: IT service management, systems integration, software architecture, Telegram Bot API, Jira Service Desk.

Погорєловська Ірина Дем'янівна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, i.d.pogorielovska@dpu.edu.ua

Бур'ян Сергій Сергійович – здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня факультету фінансів та цифрових технологій Державного податкового університету, buriansereja@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-31-41>

УДК 621.891

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕКСКАВАТОРА З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ АДСОРБОВАНОГО ШАРУ ПАР У ТРИБОСПОЛУЧЕННЯХ АКсіАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА

Косолапов В.Б., Зверев А.В.

MATHEMATICAL MODELLING OF EXCAVATOR PRODUCTIVITY TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE ADSORBED VAPOUR LAYER IN THE TRIBO-CONNECTIONS OF AN AXIAL-PISTON PUMP

Kosolapov V.B., Zverev A.V.

Ефективність роботи гусеничних гідравлічних екскаваторів значною мірою залежить від ефективності гідравлічної системи, насамперед від об'ємної продуктивності аксіально-поршневого насоса, що живить робоче обладнання. Під час тривалої експлуатації поверхні тертя насосної пари (блок циліндрів – розподільна шайба, поршень – циліндр) піддаються зношуванню, що призводить до збільшення внутрішніх витоків і поступового зниження об'ємної продуктивності, а отже, і продуктивності машини. Сучасні гідравлічні рідини для будівельної техніки містять протизносні присадки на основі поверхнево-активних речовин (ПАР), які фізично адсорбуються на мікроскопічних нерівностях металевих поверхонь і утворюють тонкий захисний шар. Ця адсорбована плівка частково компенсує шорсткість поверхні, збільшує фактичну площу контакту, зменшує локальні контактні напруження в основі нерівностей і, таким чином, уповільнює знос. Однак товщина цієї плівки не є постійною: вона зменшується під час роботи екскаватора через зниження концентрації ПАР під впливом механічних навантажень і температури. Щоб компенсувати це явище, в практиці експлуатації гідравлічних машин робоча рідина періодично замінюється за планом, відновлюючи таким чином концентрацію ПАР до початкового рівня. У статті пропонується вдосконалена математична модель, в якій товщина плівки ПАР описується експоненційним законом. При цьому відновлення властивостей гідравлічної рідини за фіксований проміжок часу враховується шляхом введення функції зміни товщини плівки ПАР в вираз для розрахунку ефективного трибологічного зазору, пов'язаного з моделлю змін витоків в насосному агрегаті осьового поршневого насоса. На цій основі

визначається залежність зміни об'ємного ККД насоса від часу роботи екскаватора та частоти заміни гідравлічної рідини. На цій основі отримано залежність об'ємного ККД насоса від часу його роботи і, в кінцевому підсумку, залежність продуктивності екскаватора від часу його роботи з урахуванням частоти заміни гідравлічної рідини в гідравлічному приводі.

Модель параметризована для гідравлічного екскаватора класу CAT 320 з об'ємом ковшу 0,75 м³ (два насоси продуктивністю 215 л/хв, робочий тиск до 35 МПа) і може бути використана для обґрунтування вибору гідравлічних рідин та інтервалів технічного обслуговування гідравлічних приводів у будівельній та дорожній техніці.

Ключові слова: гідропривод екскаватора, аксіально-поршковий насос, адсорбований шар ПАР, знос, об'ємний ККД, продуктивність

Актуальність

Експлуатаційна продуктивність екскаваторів значною мірою залежить від стану його гідравлічної системи та ККД силових агрегатів, зокрема аксіально-поршневого насоса (в подальшому – насоса). Під час довготривалої роботи елементи гідроприводу екскаваторів зазнають зношування, що призводить до поступового зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) насоса та, як наслідок, падіння продуктивності машини [1, 2]. Одним із ключових чинників, що впливають на характер зношування і втрати енергії, є трибологічні процеси в парах тертя гідроприводу та

дослідження

ефективність їх змащування [3, 4, 5]. Сучасні гідравлічні оливи містять присадки – поверхнево-активні речовини (ПАР), які адсорбуються на металевих поверхнях і утворюють захисні шари. Такі адсорбовані шари виконують роль граничної плівки – своєрідного останнього шару, що захищає метал від зносу [6, 7, 8]. Наявність міцної адсорбованої плівки здатна зменшувати тертя та уповільнювати зношування деталей, тим самим підтримуючи ККД насоса на вищому рівні протягом ресурсу. Дослідження показують, що граничне змащення, шляхом утворення адсорбційних плівок ПАР є предметом інтенсивного вивчення протягом останнього часу [8-14]. Накопичені знання окреслюють загальну картину утворення граничних-плівок, їх вплив на знос і тертя шорстких поверхонь, а також поведінку адсорбованих шарів на нано- та мікрорівні [9, 12-14]. Це створює підґрунтя для математичного моделювання процесів втрати ефективності гідравлічних машин, протягом їх експлуатації, з урахуванням трибологічних факторів.

Теоретичний аналіз дослідження

Продуктивність екскаватора залежить від швидкості виконання операцій в робочому циклі (копання, поворот, розвантаження). У загальному вигляді її можна визначити теоретичної продуктивності екскаватора, з урахуванням гідравлічного та кінематичного ККД машини за весь період роботи T [15-17]:

$$Q_{\text{екск}} = Q_0 \cdot \eta_{\text{гідпр}} \cdot \eta_{\text{кінем}}, \quad (1)$$

де $\eta_{\text{гідпр}}$ та $\eta_{\text{кінем}}$ - часо-залежні ККД відповідно гідравлічної та механічної (кінематичної) частини екскаватора; Q_0 - теоретична продуктивність екскаватора.

ККД гідравлічної системи екскаватора $\eta_{\text{гідпр}}$, значною мірою, визначає гідравлічний насос, який забезпечує подачу РР до всіх виконавчих органів екскаватора (гідроциліндрів стріли, рукояті, ковша, поворотного механізму платформи). Тобто, виконавчі органи екскаватора, і відповідно їх гідропривід, працюють епізодично протягом робочого циклу, на відміну від аксіально-поршневого насоса. Тому в даній моделі було прийнято умову

$$\eta_{\text{гідпр}}(t) \approx \eta_{\text{нас}}(t), \quad (2)$$

де $\eta_{\text{нас}}(t)$ – поточний ККД насоса.

За такої умови продуктивність екскаватора за час використання T прийме такий вигляд:

$$Q_{\text{екск}}(t) = \int_0^T Q(t) \cdot \eta_{\text{нас}}(t) \cdot \eta_{\text{кінем}}(t) dt. \quad (3)$$

Це спрощена модель, яка дозволяє оцінити вплив змін, що відбуваються з технічним станом насоса, в процесі експлуатації екскаватора, на його працездатність. Робота екскаватора супроводжується постійним зниженням ККД гідроприводу через знос. Якщо режим роботи двигуна підтримується постійним, то падіння ККД насоса $\eta_{\text{нас}}(t)$ уповільнює виконання робочих операцій у циклі [11]. Відповідно, за фіксований час, екскаватор здійснить менше циклів копання, що призведе до зниження його продуктивності. В реальних умовах, для підтримання продуктивності екскаватора, з метою часткового компенсування зниження $\eta_{\text{нас}}(t)$, вдаються до збільшення кількості обертів на валу насоса. Але, це веде до зростання витрат палива і додаткового навантаження на систему гідроприводу в цілому.

Механічний ККД $\eta_{\text{кінем}}(t)$ визначає частину потужності, яка витрачається на тертя в трибосполученнях елементів робочого обладнання екскаватора та нагрів РР, який супроводжується зміною її параметрів. Однак, в даній роботі розглядається робота гідроприводу в усталеному режимі, тобто трибопроцеси в гідроприводі стабілізувалися, розвиваються з мінімальною інтенсивністю та не призводять до нагріву РР поза нормовані значення і, таким чином, не впливають (або впливають не значною мірою) на швидкість зміни параметрів РР в процесі роботи екскаватора. Відповідно до цього припущення, коефіцієнт $\eta_{\text{кінем}}(t)$ приймається постійним, а його зміна в процесі роботи екскаватора не досліджується.

У загальному вигляді коефіцієнт корисної дії насоса $\eta_{\text{нас}}$ визначається добутком його об'ємної та гідромеханічної складових [15, 16]:

$$\eta_{\text{нас}}(t) = \eta_{\text{в}}(t) \cdot \eta_{\text{гм}}(t), \quad (4)$$

де $\eta_{\text{в}}(t)$ – об'ємний ККД; $\eta_{\text{гм}}(t)$ – гідромеханічний (механічний) ККД; t – час роботи.

Відомо, що об'ємний ККД $\eta_{\text{в}}(t)$ характеризує втрати подачі насоса через внутрішні протікання РР [15,17-19]. Ідеальний

(новий) насос при кожному оберті подає теоретичний об'єм рідини $Q_{\text{теор}}$ [10, 12]

$$Q_t = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot z \cdot n \cdot D \cdot \tan \gamma}{4} \quad (5)$$

де Q_t – теоретична подача насоса; d – діаметр поршня; z – кількість поршнів; n – частота обертання ротор; D – діаметр розташування поршнів (діаметр ділення); γ – кут нахилу блоку циліндрів або диску.

В реальних умовах частина рідини просочується через зазори в рухомих сполученнях качаючого вузла з зони підвищеного тиску (нагнітання) до дренажної магістралі насоса. Величина втрат подачі насоса $Q_{\text{втр}}(t)$, за умов розвитку процесу зносу, постійно зростають внаслідок збільшення зазорів у циліндро-поршневі групі та сполученні «блок циліндрів-розподільувач». Втрату подачі насосом прийнято визначати зниженням його об'ємного ККД [10, 12]:

$$\eta_b(t) = 1 - \frac{Q_{\text{втр}}(t)}{Q_{\text{теор}}} \quad (6)$$

де $Q_{\text{втр}}(t)$ – витік РР унаслідок зносу в моменту часу t ; $Q_{\text{теор}}$ – теоретична подача рідини насосом.

Якщо даний вираз записати відносно зазору в сполученнях, то він буде мати наступний вигляд [3, 18]

$$\eta_b(t) = \eta_{b_0} \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{\delta(t) - \delta_0}{\delta_{\text{кр}} - \delta_0} \right), \quad (7)$$

де η_{b_0} — початкове значення ККД насоса; δ_0 — початковий зазор в трибосполученні; $\delta(t)$ — поточний зазор в трибосполученні; $\delta_{\text{кр}}$ — критичний зазор в трибосполученні; $\beta \in (0;1)$ — коефіцієнт чутливості до зносу.

З виразу (7) видно, що збільшення зазору (зношування поверхонь тертя насоса) призводить до зниження $\eta_b(t)$, що проявляється у сповільненні руху робочих органів і збільшенні тривалості робочого циклу екскаватора [11]. У результаті, якщо зазначений процес деградації трибосполучення продовжується, гідросистема втрачає

працездатність і гідронасос потребуватиме ремонту або заміни.

Відомо, що одним із ключових факторів, що впливають на динаміку змін характеристики ККД насоса, є наявність на його поверхнях тертя адсорбованих шарів поверхнево-активних речовин (ПАР), дія яких суттєво впливає на процеси зносу та формування зазорів у рухомих сполученнях качаючого вузла [20, 21].

Гідромеханічний ККД насоса $\eta_{\text{гм}}(t)$ відображає втрати на тертя і гідравлічний опір у насосі. Значна частка цих втрат у насосі зумовлена силами тертя в циліндро-поршневій групі, підшипниках та у сполученні «шайба-розподільувач – блок циліндрів». Інтегрально, гідромеханічний ККД насоса визначається співвідношенням корисної потужності на валу насоса W_a до підведеної потужності W

$$\frac{d\eta_{\text{нас}}}{dt} = -\frac{W_a}{W} \quad (8)$$

За реальних умов експлуатації екскаватора, зниження об'ємного ККД насоса $\eta_b(t)$ спонукає оператора підвищувати оберти валу приводу насоса, що призводить до збільшення питомих витрат палива і зниження загальної ефективності роботи машини. Окрім того, підвищення обертів валу насоса призводить до збільшення швидкості переміщення поверхонь тертя в сполученнях, що спричиняє зростання шляху тертя за розрахунковий проміжок часу. Таким чином, за постійного тиску в сполученнях, протягом розрахункового інтервалу часу, збільшуються робота сил тертя, що призводить до зменшення гідромеханічного коефіцієнта корисної дії $\eta_{\text{гм}}(t)$ [16, 19].

Відповідно до попереднього припущення щодо роботи гідроприводу в усталеному режимі і виключенні впливу (або не значному впливу) процесу тертя в рухомих сполученнях насоса на швидкість зміни параметрів РР, в процесі роботи екскаватора, припускаємо, що $\eta_{\text{гм}}(t) = \text{const}$. Тобто, параметром, що не впливає на динаміку (прискорення) змін ККД насоса.

Для математичного опису динаміки ККД аксіально-поршневого насоса, у даному дослідженні, приймаємо, що основним чинником зниження $\eta_{\text{нас}}(t)$ є прогресуючі витоки у його качаючому вузлі, пов'язане із зносом в їх рухомих сполученнях, як наслідком впливу зміни параметрів адсорбованих на їх поверхнях шарів ПАР.

Таким чином, відповідно до виразу (1) та зазначених вище припущень щодо цього дослідження, прогнозована зміна продуктивності екскаватора протягом розрахункового періоду може бути визначена відповідно до виразу

$$\Delta Q_{\text{екск}}(t) = Q_0 \cdot \eta_{\text{гм}} \cdot (1 - \eta_{\text{нас}}(t)) \quad (9)$$

Метою роботи є розробка науково обґрунтованої моделі зміни продуктивності екскаватора протягом часу його експлуатації, з урахуванням зміни параметрів адсорбованого шару ПАР на поверхнях тертя аксіально-поршневого насосу.

Завданням дослідження:

виконати аналітичний огляд для вибору простої, але фізично обґрунтованої функції $\delta(t)$;

- отримати кореговані залежності $\delta(t)$, $\eta_{\text{нас}}(t)$, $Q_{\text{екск}}(t)$ та $\Delta Q_{\text{екск}}(t)$ в яких додано вплив адсорбованого шару ПАР;

- проілюструвати модель числовим прикладом для типового екскаватора з ковшем 0,75 м³.

6. Основний матеріал дослідження

Для моделювання зміни об'ємного ККД аксіально-поршневого насоса $\eta_{\text{нас}}(t)$, з урахуванням змін параметрів адсорбційного шару ПАР на поверхнях його трибосполучень, була прийнята модель залежності ККД насоса від зазору в рухомих сполученнях качаючого вузла насосу, яка має вигляд [1, 18]

$$d\eta_{\text{нас}}(t) = \eta_{\text{нас}_0} \cdot \left(1 - \beta \cdot \frac{d\delta(t) - \delta_0}{\delta_{\text{кр}} - \delta_0} \right) \quad (10)$$

де $\eta_{\text{нас}_0}$ — початкове значення ККД; $\delta(t)$ — поточний зазор; δ_0 — початковий зазор; $\delta_{\text{кр}}$ — критичний зазор (межа герметичності); $\beta \in (0;1)$ — коефіцієнт чутливості до зносу [1, 3, 18].

Щоб відобразити вплив кількості шарів ПАР, адсорбованих на поверхнях тертя качаючого вузла насосу, на динаміку зносу, в математичну модель визначення зміни зазору в парі тертя введено функцію зміни зазору через темп зносу та функцію зміни в часі товщини адсорбованого на поверхнях шару ПАР [3]:

$$d\delta(t) = d\delta_{\text{п}}(t) - dh_{\text{адс}}(t) = \quad (11)$$

$$= \delta_0 \cdot \left(1 + \alpha(t) \cdot \frac{R_z}{R_z^{\text{етал}}} \cdot \frac{t}{T_{\text{макс}}} \right) - h_{\text{адс}}(t)$$

де $\alpha(t)$ - функція зміни темпу зносу; $h_{\text{адс}}(t)$ - поточна сумарна товщина адсорбованих шарів ПАР; R_z - поточна шорсткість поверхні трибосполучення; $R_z^{\text{етал}}$ - еталонна шорсткість, від якої масштабуються інші значення R_z .

Функція зміни темпу зносу $\alpha(t)$, в виразі (11), базується на аналізі попередніх досліджень зміни об'ємного ККД гідравлічних екскаваторів за час їх використання на роботах, пов'язаних з будівництвом доріг та у кар'єрах з видобутку дорожньо-будівельних матеріалів. [3, 22]

$$\alpha(t) = 0.35 \cdot e^{-k \cdot n(t)} \quad (12)$$

де k - коефіцієнт, що описує ефективність шарів ПАР у стримуванні зносу, $k = 0.01$; $n(t)$ - поточна кількість шарів ПАР.

Коефіцієнт 0,35 у виразі (12) - це емпіричний параметр, який базується на експлуатаційних спостереженнях аксіально-поршневих насосів екскаваторів САТ (або аналогічних) і враховує середньозважене зростання зазору до ~ 35% за весь типовий ресурс (3000 годин), та відповідає типовій зміні зазору (на 2–3 мкм) в кінці їх ресурсу при помірних режимах навантаження [1, 3].

Для нормування впливу реальної шорсткості застосовується співвідношення $\frac{R_z}{R_z^{\text{етал}}}$, яке дозволяє враховувати ступінь впливу поточної шорсткості поверхонь тертя в трибосполученні.

Поточна кількість шарів ПАР визначається з виразу

$$dn(t) = \frac{dh_{\text{адс}}(t)}{h_{\text{адс}_0}} \quad (13)$$

де $h_{\text{адс}_0}$ - товщина одного адсорбованого шару ПАР; $dh_{\text{адс}}(t)$ - поточна товщина адсорбованих шарів ПАР на поверхні.

Для орієнтовної оцінки товщини одного адсорбованого шару ПАР визначимо уявні геометричні параметри молекули у вигляді сфероїда (рис. 1). У якості ПАР приймаємо (для даного розрахунку) беззольну протизносну

присадку БМА-5 (тіоефір діалкідітіофосфорної кислоти) з масою молекули $M_{ПАР} = 3,86 \cdot 10^{-25}$ кг; густиною $\rho = 0,9 \cdot 10^3$ кг/м³ [23-25].

Об'єм молекули визначимо з виразу:

$$V_{ПАР} = \frac{M_{ПАР}}{\rho} = \frac{3,86 \cdot 10^{-25}}{0,9 \cdot 10^3} = 3,18 \cdot 10^{-28} \text{ м}^3 \quad (14)$$

Вважаємо, що молекула має форму і її об'єм дорівнюватиме

$$V_{ПАР} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot k \cdot b^3, \quad (15)$$

де $k = \frac{a}{b}$

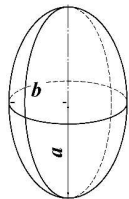


Рис. 1. Розрахункова модель молекули ПАР

За умови $k = 5$ розміри молекули ПАР будуть дорівнювати

$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{ПАР}}{4 \cdot \pi \cdot k}} = 2,4 \text{ \AA} \quad (16)$$

$$a = b \cdot k = 12 \text{ \AA}$$

Відповідно при $k = 1$

$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{ПАР}}{4 \cdot \pi \cdot k}} \approx 4,2 \text{ \AA} \quad (16)$$

$$a = b \cdot k = 4,2 \text{ \AA}$$

Тобто, товщину одного шару (моношару) ПАР можна попередньо прийняти в межах $4,2 - 12 \text{ \AA}$

Попередніми дослідженнями зміни параметрів адсорбованих шарів ПАР з РР ISO НМ 46 [26] доведено, що з часом її використання у гідроприводах екскаваторів товщина адсорбованих шарів на металевій поверхні суттєво змінюється. Результати вимірів наведено у табл. 1

За наведеними даними щодо досліджених зразків РР, шляхом апроксимації, було отримано функції залежності товщини адсорбованих шарів ПАР цієї рідини від часу напрацювання в гідроприводі екскаватору:

$$h_{адс}(t) = 0,1235 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,203 \cdot t} \quad (17)$$

Відповідно до виразу (12), поточна кількість шарів ПАР, що адсорбуються на металевій поверхні, визначається з виразу

$$n(t) = \frac{0,1235 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-0,203 \cdot t}}{h_{адс, моно}} \quad (18)$$

Результати розрахунків зміни кількості адсорбованих шарів ПАР від часу напрацювання в гідроприводі екскаватору наведено на графіку (рис. 2). З графіка видно, що зі збільшенням часу експлуатації екскаватора відбувається значне зменшення кількості адсорбованих шарів ПАР на металевих поверхнях (за 1200 годин більше ніж удвічі), що обумовлено як термоокислювальною деструкцією присадок, так і механічним руйнуванням адсорбційних шарів у умовах граничного тертя в сукупності з видаленням ПАР, адсорбованих на поверхнях забруднювачів РР, фільтрами [27, 28].

Таблиця 1

Середня товщина адсорбованого шару ПАР на поверхні кульки

Температура виміру, °K	Час напрацювання T, год	Товщина адсорбованого шару ПАР на поверхні кульки, мкм					
		0	200	400	600	800	1000
293		0,224	0,186	0,14	0,1012	0,0741	0,0526
313		0,2022	0,1658	0,13	0,1	0,0842	0,0681
323		0,1853	0,1523	0,1206	0,0965	0,0836	0,0694
333		0,1624	0,1341	0,1085	0,0878	0,073	0,0627

(кулька STEEL BALL 11.112MM G3 ISO 3290-1)

За розробленою математичною моделлю виконано прогнозування зміни об'ємного ККД на прикладі екскаватора CAT 320 GC за вихідними даними [29, 30] наведеними у таблиці 2.

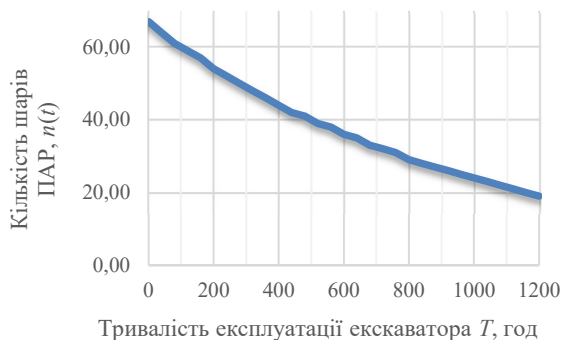


Рис. 2. Графік прогнозованої зміни кількості адсорбованих шарів ПАР від часу напрацювання в гідроприводі екскаватора

Для подовження терміну експлуатації насосів, за практики експлуатації одноковшевих екскаваторів, рекомендовано виконувати заміну РР гідроприводів через кожні 240 - 400 маш.-годин їх експлуатації [26, 28]. Відповідно до цих рекомендацій виконано корегування щодо математичної моделі розрахунку зміни товщини адсорбційного шару протягом розрахункового періоду T .

Результати розрахунків прогнозованої зміни $\eta_{\text{нас}}(t)$ наведено на відповідних графіках (рис. 3).

За умови отримання раціональних результатів від використання екскаваторів загально прийнято, що величина зниження об'ємного ККД не повинна перевищувати 15-25% від вихідного значення в залежності від умов його використання [29, 30].

Результати комп'ютерного моделювання демонструють значне зниження об'ємного ККД аксіально-поршневого насоса протягом експлуатаційного періоду. Як видно з рис. 3, критичне значення ККД (25% втрат від початкового значення) досягається вже через 750-900 годин роботи, що значно нижче гарантованого виробником ресурсу в 3000 годин [29, 30].

$$Q_{\text{екск}}(t) = \int_0^T Q(t) \cdot \eta_{\text{нас}}(t) \cdot \eta_{\text{кінем}}(t) dt. \quad (19)$$

За умови $\eta_{\text{кінем}}(t) \text{ const}$

$$Q_{\text{екск}}(t) = \eta_{\text{кінем}} \int_0^T Q(t) \cdot \eta_{\text{нас}}(t) dt. \quad (20)$$

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Фізичний зміст	Од. виміру	
p_p	Робочий тиск	МПа	30
$\eta_{\text{нас}_0}$	Початкове значення ККД насосу		0.987
$Q_{\text{ном}}$	Початкова подача насосу	л/хв	215
T	Тривалість експлуатації	год	3000
V	Об'єм ковша	м ³	0.75
δ_0	Початковий зазор	мкм	7
$h_{\text{адс}_{\text{моно}}}$	Товщина одного адсорбованого шару ПАР	м	$3 \cdot 10^{-9}$
$h_{\text{адс}}$	Сумарна товщина адсорбованих шарів ПАР		
R_z	Поточна шорсткість		$0.4 \cdot 10^{-6}$
$R_z^{\text{етал}}$	Рівноважна шорсткість		$0.2 \cdot 10^{-6}$
0.35	Темп зношування відносно ресурсу (тобто 35% приросту зазору за повний ресурс при базовій шорсткості)		
$\frac{R_z}{R_z^{\text{етал}}}$	Нормована вага шорсткості: чим вищий R_z , тим інтенсивніший знос		

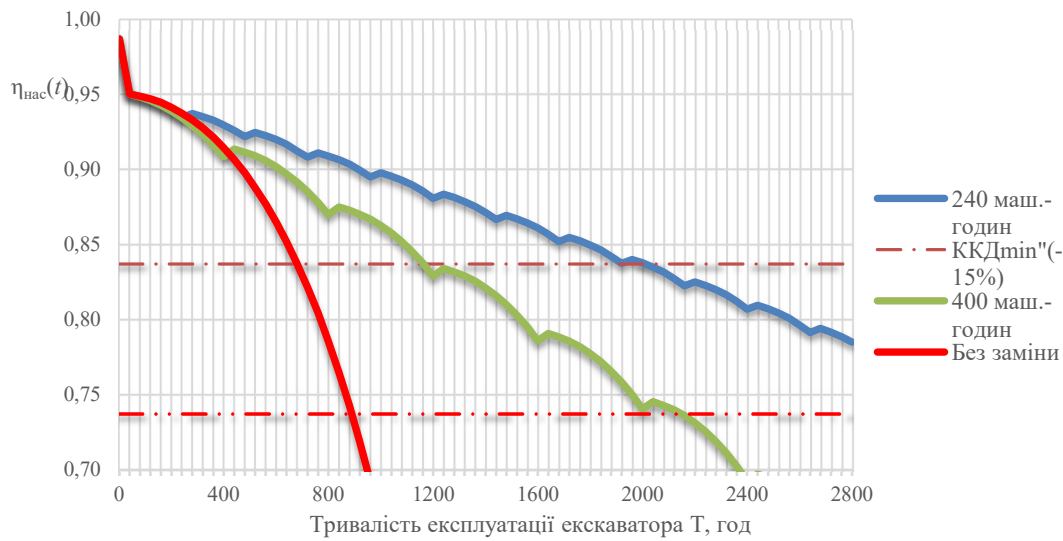


Рис. 3. Графік прогнозованої зміни об'ємного ККД насосу екскаватора

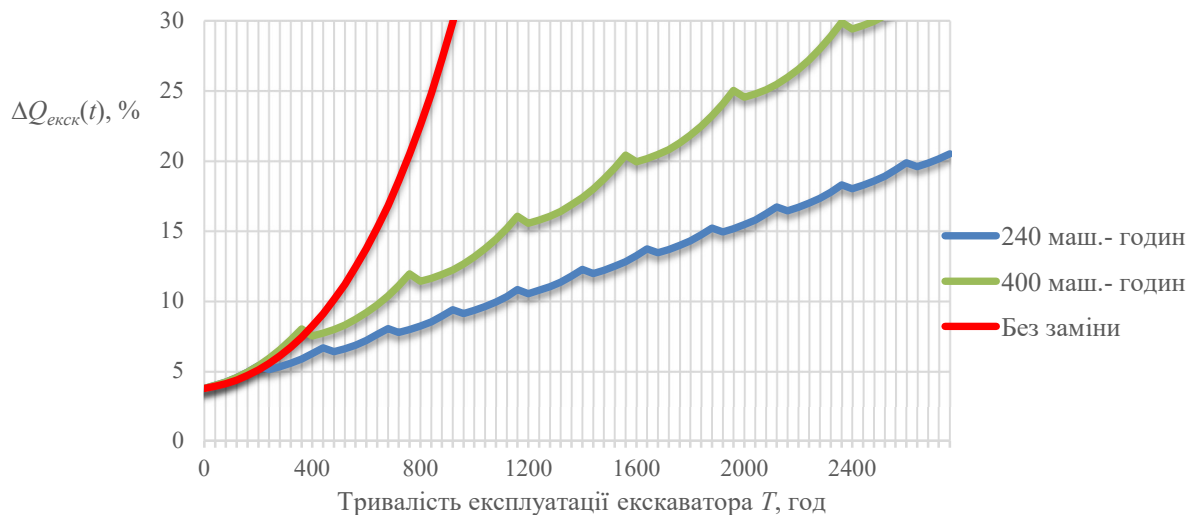


Рис. 4. Графік прогнозованого зменшення продуктивності екскаватора при зміні адсорбованого шару ПАР

Для оцінки ступеню зниження продуктивності екскаватора в залежності від змін адсорбційної здатності РР гідроприводу екскаватора протягом часу його експлуатації виконано розрахунки за виразом

$$\Delta Q_{екск}(t) = \frac{Q(t_i) \cdot \eta_{нас}(t_i) - Q(t_{i+1}) \cdot \eta_{нас}(t_{i+1})}{Q(t_0) \cdot \eta_{нас}(t_0)} \cdot 100. \quad (21)$$

Результати розрахунків прогнозованого зменшення продуктивності екскаватора $\Delta Q_{екск}(t)$ при зміні адсорбованого шару ПАР наведено на відповідних графіках (рис. 4).

Аналіз результату моделювання зміни ККД, виходячи з умови використання РР без відновлення протягом 1200 машино-годин,

показує, що зміна ККД до критичного значення відбувається протягом 750...900 годин (рис. 3), що значно нижче часу роботи до критичного стану, гарантованого компаніями-виробниками. Застосування періодичної заміни РР протягом періоду роботи екскаватора значно підвищує час напрацювання насоса до критичного стану. Так за умови заміни РР з періодичністю 400 годин напрацювання до критичного стану збільшується в ~2 рази, а при заміні РР через 240 годин – більше ніж у 3,5 рази. Запропонована модель, хоча й побудована на відносно простих припущеннях (експоненціальна деградація $h_{нас}(t)$, рівномірний розподіл мікроставів,

узагальнений коефіцієнт витікання РР $\eta_v(t)$, дозволяє:

- пов'язати стан робочої рідини ($h_{алс}(t)$) з зазором $\delta(t)$;
- кількісно оцінити вплив інтервалів заміни масла на об'ємний ККД насоса;
- оцінити втрату продуктивності машини при збільшенні напрацювання.

Висновки. 1 Запропоновано математичну модель зміни продуктивності екскаватора, яка враховує динаміку зміни параметрів адсорбованих шарів ПАР на поверхнях тертя аксіально-поршневого насоса.

2. Встановлено, що суттєвими фактором зниження об'ємного ККД насоса є прогресуючі витоки РР через збільшення зазорів у циліндро-поршневій, та розподільчій групі качаючого вузла насоса, які інтенсивно зростають через деградацію адсорбційних шарів ПАР і після 700 годин експлуатації призводять до критичної зміни $\eta_{об}$ насосу.

3. Доведено експоненційний характер зменшення товщини адсорбованого шару ПАР з часом експлуатації, що призводить до зниження кількості захисних шарів з 75 до 35 за 1000 годин роботи.

4. Практичні рекомендації щодо встановлення скороченого інтервалу заміни РР (240-400 годин) дозволяє значно збільшувати термін часу напрацювання гідравлічних систем екскаваторів до настання критичного стану $\eta_{об}$ насосу, тобто дозволяє підтримувати продуктивність на рівні 85-90% від номінальної.

5. Математична модель дозволяє прогнозувати критичні параметри стану гідравлічної системи: зниження об'ємного ККД насоса базуючись на результатах періодичного діагностування темпу зменшення адсорбційної спроможності РР. (в даному випадку, зменшення кількості шарів ПАР менше 40, що свідчить про необхідність технічного обслуговування). Запропонована модель може бути використана для оптимізації інтервалів технічного обслуговування (заміни масла), вибору складу протизносних присадок, а також для інтеграції в більш комплексні системні моделі гідроприводів будівельних машин.

6. Подальший розвиток роботи доцільно пов'язати з експериментальним визначенням параметрів δ_0 , δ_{min} , k_1 для конкретних марок робочих рідин та матеріалів трибосполучень.

Література

1. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples / J. M. I. Bergada та ін. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Т. 36, вип. 4. С. 1731–1751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016>.
2. Zawistowski T., Kleiber M. Gap flow simulation methods in high pressure variable displacement axial piston pump. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Т. 24. С. 519–542. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9180-5>.
3. Ivantysyn J., Ivantysynova M. Hydrostatic pumps and motors: Principles, design, performance, modelling, analysis, control and testing : monograph. New Delhi : Tech Books International, 2003. 512 с.
4. Войтов В. А. В. А. Конструктивна зносостійкість вузлів тертя гідромашин. Частина II : методологія моделювання граничного змащення в гідромашинах.. Харків : Центр Леся Курбаса, 1997. 152 с.
5. Hamrock B. J., Schmid S. R., Jacobson B. O. Fundamentals of fluid film lubrication : 2nd ed.. Boca Raton : CRC Press, 2004. 728 с. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203021187>.
6. Noria Corporation. Tribology explained. *Noria Corporation. Lubrication (Machinery Lubrication)*. URL: <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340..>
7. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces. San Diego : Academic Press, 2011. 674 с. ISBN 978-0-12-391927-4.
8. Michael P. W., Mettakadapa S., Shahahmadi S. *An adsorption model for hydraulic motor lubrication*. 2015. Т. 138, вип. 1. (Article ; т. 011801). URL: <https://10.1115/1.4031139>.
9. Zhang J., Meng Y. *Boundary lubrication by adsorption film*. 2015. Т. 3, вип. 2. С. 115–147. URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>.
10. Spikes H. Friction modifier additives. *Tribology Letters*. 2015. Т. 60, вип. 1. С. 1–26. URL: <https://10.1007/s11249-015-0589-z>.
11. Stålgren J. J. R., Eriksson J., Boschkova K. Adsorption and frictional properties of surfactant assemblies at solid surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. Т. 234, вип. 1. С. 1–10.
12. Stålgren J. J. R. J. J. R. Adsorption of surfactants at the solid–liquid interface : автореф. дис. ... д-ра / Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, 2002..
13. Lu K., Wang X., Qu J. Adsorption behavior and lubrication mechanism of surfactants on metal surfaces. *Tribology International*. 2021. Т. 157. (Article ; т. 106861). URL: <https://10.1016/j.triboint.2021.106861..>
14. Somasundaran P., Krishnakumar S. Adsorption of surfactants and their mixtures at solid–liquid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2000. Т. 88, вип. 2. С. 179–208. URL: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00045-2).

15. Аврун Г. А., Кириченко І. Г., Самородов В. Б. Гідравлічне обладнання будівельних та дорожніх машин : підручник. Харків : ХНАДУ, 2016. 438 с.
16. Berendsen Fluid Power. What loss of efficiency tells you about hydraulic pump and motor wear. *Berendsen Fluid Power*. URL: <https://berendsen.com.au/understanding-hydraulic-pump-motor-efficiency>.
17. Manring N. D. Hydraulic control systems : 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2020. 432 с.
18. Bergada J. M., Watton J., Ebrahimi A. A complete analysis of axial piston pump leakage and lubricating interfaces. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Т. 36, вип. 11. С. 5498–5513. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.032>.
19. Shorbagy A., Ivantysyn R., Weber J. Holistic analysis of the tribological interfaces of an axial piston pump – focusing on the pump’s efficiency. *Chemical Engineering & Technology*. 2023. Т. 46, вип. 1. С. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.202200450>.
20. Косолапов В. Б., Литовка С. В. Определение зазора в сопряжении «поршень–втулка» аксиально-поршневого насоса гидропривода мобильных машин с учетом толщины смазочной пленки рабочей жидкости. *Интерстроймех – 2010 : материалы междунар. Науч.-техн. Конф.* Белгород, 2010. Т. 1. С. 213–219.
21. Косолапов В. Б., Литовка С. В. Влияние параметров смазочной пленки рабочей жидкости на ресурс гидропривода мобильных машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Т. 128 : Серія «Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва». С. 256–260.
22. Yin W., Yu Y., Zhao Y. Volumetric efficiency degradation prediction of axial piston pump based on friction and wear test. *Processes*. 2024. Т. 12, вип. 3. (Article 424). URL: <https://doi.org/10.3390/pr12030424>.
23. Лысиков Е. Н., Косолапов В. Б., Воронин С. В. Надмолекулярные структуры жидких смазочных сред и их влияние на износ технических систем : монография : монография. Харьков : ЭДЭНА, 2009. 274 с.
24. Totten G. E. G. E. Handbook of lubrication and tribology. Boca Raton : CRC Press, 2006. Т. 1 : Application and maintenance. 213 с.
25. Minfray C., Martin J.-M., Esnouf C. A multi-technique approach of tribofilm characterisation. *Thin Solid Films*. 2008. Т. 516, вип. 12. С. 4106–4112.
26. Косолапов В. Б., Литовка С. В. Экспериментальные исследования толщины смазочной пленки рабочей жидкости гидропривода в процессе эксплуатации мобильных машин. *Интерстроймех – 2010 : материалы междунар. Науч.-техн. Конф.* Белгород, 2010. Т. 1. С. 209–212.
27. Maruyama T., et al. In situ quantification of oil film formation and breakdown using electrical impedance. *Tribology Transactions*. 2018. Т. 61, вип. 6. С. 1051–1061. URL: <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1468519>.
28. Косолапов В. Б., Литовка С. В. Оцінка впливу частоти заміни рідини гідроприводу трансмісії на техніко-економічні показники сільськогосподарських машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2010. Т. 2, вип. 95. С. 225–229.
29. Caterpillar Inc. 320 Hydraulic Excavator. Technical specifications. Hydraulic system – maximum flow 429 L/min; maximum pressure 35 000 kPa. *Caterpillar Inc.* URL: https://www.cat.com/en_MX/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/126534.html.
30. Caterpillar Inc. 320 Hydraulic Excavator. Product brochure and specifications. Bucket capacities and working ranges. *Caterpillar Inc.* URL: <https://www.foleyinc.com/wp-content/uploads/2025/02/320-gc-next-gen-brochure.pdf>.

References

1. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples / J. M. Bergada та ін. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Т. 36, вип. 4. С. 1731–1751. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016>.
2. Zawistowski T., Kleiber M. Gap flow simulation methods in high pressure variable displacement axial piston pump. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2017. Т. 24. P. 519–542. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9180-5>.
3. Ivantysyn J., Ivantysynova M. Hydrostatic pumps and motors: Principles, design, performance, modelling, analysis, control and testing : monograph. New Delhi : Tech Books International, 2003. 512 p.
4. Vojtov V. A. V. A. Konstruktivna znosostijkist vuzliv tertya gidromashin. Chastina II : metodologiya modelyuvannya granichnogo zmathennya v gidromashinah.. Harkiv : Centr Lesya Kurbasa, 1997. 152 p.
5. Hamrock B. J., Schmid S. R., Jacobson B. O. Fundamentals of fluid film lubrication : 2nd ed.. Boca Raton : CRC Press, 2004. 728 p. URL: <https://doi.org/10.1201/9780203021187>.
6. Noria Corporation. Tribology explained. *Noria Corporation. Lubrication (Machinery Lubrication)*. URL: <https://www.machinerylubrication.com/tribology-31340..>

7. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces. San Diego : Academic Press, 2011. 674 p. ISBN 978-0-12-391927-4.
8. Michael P. W., Mettakadapa S., Shahahmadi S. *An adsorption model for hydraulic motor lubrication*. 2015. Т. 138, вип. 1. (Article ; т. 011801). URL: <https://10.1115/1.4031139>.
9. Zhang J., Meng Y. *Boundary lubrication by adsorption film*. 2015. Т. 3, вип. 2. P. 115–147. URL: <https://doi.org/10.1007/s40544-015-0084-4>.
10. Spikes H. Friction modifier additives. *Tribology Letters*. 2015. Т. 60, вип. 1. P. 1–26. URL: <https://10.1007/s11249-015-0589-z>.
11. Stålgren J. J. R., Eriksson J., Boschkova K. Adsorption and frictional properties of surfactant assemblies at solid surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. Т. 234, вип. 1. P. 1–10.
12. Stålgren J. J. R. J. R. Adsorption of surfactants at the solid–liquid interface : автореф. дис. ... д-ра / Royal Institute of Technology (KTH). Stockholm, 2002..
13. Lu K., Wang X., Qu J. Adsorption behavior and lubrication mechanism of surfactants on metal surfaces. *Tribology International*. 2021. Т. 157. (Article ; т. 106861). URL: <https://10.1016/j.triboint.2021.106861..>
14. Somasundaran P., Krishnakumar S. Adsorption of surfactants and their mixtures at solid–liquid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2000. Т. 88, вип. 2. P. 179–208. URL: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(00)00045-2).
15. Avrunin G. A., Kirichenko I. G., Samorodov V. B. *Gidravlichne obladnannya budivelnih ta dorozhnikh mashin : pidruchnik*. Harkiv : HNADU, 2016. 438 p.
16. Berendsen Fluid Power. What loss of efficiency tells you about hydraulic pump and motor wear. *Berendsen Fluid Power*. URL: <https://berendsen.com.au/understanding-hydraulic-pump-motor-efficiency>.
17. Manring N. D. *Hydraulic control systems : 2nd ed*. Hoboken : Wiley, 2020. 432 p.
18. Bergada J. M., Watton J., Ebrahimi A. A complete analysis of axial piston pump leakage and lubricating interfaces. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Т. 36, вип. 11. P. 5498–5513. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.12.032>.
19. Shorbagy A., Ivantysyn R., Weber J. Holistic analysis of the tribological interfaces of an axial piston pump – focusing on the pump’s efficiency. *Chemical Engineering & Technology*. 2023. Т. 46, вип. 1. P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1002/ceat.202200450>.
20. Kosolapov V. B., Litovka S. V. *Opredelenie zazora v sopryazhenii «porshen–vtulka» aksialno-porshnevoogo nasosa gidroprivoda mobilnyh mashin s uchetom tolshiny smazochnoj plenki rabochej zhidkosti*. *Interstrojmeh – 2010 : materialy mezhdunar. Nauch.-tehn. Konf.* Belgorod, 2010. Т. 1. P. 213–219.
21. Kosolapov V. B., Litovka S. V. *Vliyanie parametrov smazochnoj plenki rabochej zhidkosti na resurs gidroprivoda mobilnyh mashin*. *Visnik Harkivskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka*. Т. 128 : Seriya «Problemi nadijnosti mashin ta zasobiv mehanizaciyi silskogospodarskogo virobництва. P. 256–260.
22. Yin W., Yu Y., Zhao Y. Volumetric efficiency degradation prediction of axial piston pump based on friction and wear test. *Processes*. 2024. Т. 12, вип. 3. (Article 424). URL: <https://doi.org/10.3390/pr12030424>.
23. Lysikov E. N., Kosolapov V. B., Voronin S. V. *Nadmolekulyarnye struktury zhidkih smazochnyh sred i ih vliyanie na iznos tehniceskikh sistem : monografiya : monografiya*. Harkov : EDENA, 2009. 274 p.
24. Totten G. E. G. E. *Handbook of lubrication and tribology*. Boca Raton : CRC Press, 2006. Т. 1 : Application and maintenance. 213 p.
25. Minfray C., Martin J.-M., Esnouf C. A multi-technique approach of tribofilm characterisation. *Thin Solid Films*. 2008. Т. 516, вип. 12. P. 4106–4112.
26. Kosolapov V. B., Litovka S. V. *Eksperimentalnye issledovaniya tolshiny smazochnoj plenki rabochej zhidkosti gidroprivoda v processe ekspluatacii mobilnyh mashin*. *Interstrojmeh – 2010 : materialy mezhdunar. Nauch.-tehn. Konf.* Belgorod, 2010. Т. 1. P. 209–212.
27. Maruyama T., et al. In situ quantification of oil film formation and breakdown using electrical impedance. *Tribology Transactions*. 2018. Т. 61, вип. 6. P. 1051–1061. URL: <https://doi.org/10.1080/10402004.2018.1468519>.
28. Kosolapov V. B., Litovka S. V. *Ocinka vplivu chastoti zamini ridini gidroprivodu transmisiyi na tehniko-ekonomichni pokazniki silskogospodarskikh mashin*. *Visnik Harkivskogo nacionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasilenka*. 2010. Т. 2, вип. 95. P. 225–229.
29. Caterpillar Inc. 320 Hydraulic Excavator. Technical specifications. Hydraulic system – maximum flow 429 L/min; maximum pressure 35 000 kPa. *Caterpillar Inc.* URL: https://www.cat.com/en_MX/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/126534.html.
30. Caterpillar Inc. 320 Hydraulic Excavator. Product brochure and specifications. Bucket capacities and working ranges. *Caterpillar Inc.* URL: <https://www.foleyinc.com/wp-content/uploads/2025/02/320-gc-next-gen-brochure.pdf>.

Kosolapov V.B., Zverev A.V. Mathematical modelling of excavator productivity taking into account the parameters of the adsorbed vapour layer in the triboconnections of an axial-piston pump

The performance of crawler hydraulic excavators largely depends on the efficiency of the hydraulic system, primarily on the volumetric capacity of the axial piston pump that supplies the working equipment. During prolonged operation, the mating surfaces of the pump tribopair (cylinder block – distribution washer, piston – cylinder) are subject to wear, which leads to an increase in internal leaks and a gradual decrease in volumetric efficiency and, as a result, machine productivity. Modern hydraulic fluids for construction equipment contain anti-wear additives based on surfactants (SAS), which are physically adsorbed on microscopic irregularities of metal surfaces and form a thin protective film.

This adsorbed film partially compensates for surface roughness, increases the actual contact area, reduces local contact stresses at the base of irregularities and thus slows down wear. However, the thickness of this film is not constant: it decreases during the operation of the excavator due to a reduction in the concentration of SAS under the influence of mechanical loads and temperature. To compensate for this phenomenon, in the practice of operating hydraulically driven machines, the working fluid is periodically replaced as planned, thus restoring the concentration of SAS to its initial level. The article proposes a refined mathematical model in which the thickness of the SAS film is described by an exponential law. At the same time, the restoration of the properties of the hydraulic fluid over a fixed time interval is taken into account by introducing the function of changing the thickness of the surfactant film into the expression for

calculating the effective tribological clearance associated with the model of leakage changes in the pumping unit of an axial piston pump. On this basis, the dependence of the change in the volumetric efficiency of the pump on the operating time of the excavator and the frequency of hydraulic fluid replacement is determined.

On this basis, the dependence of the volumetric efficiency of the pump on its operating time was obtained and, ultimately, the dependence of the excavator's performance on its operating time, taking into account the frequency of replacement of the hydraulic fluid in the hydraulic drive.

The model is parameterised for a CAT 320 class hydraulic excavator with a bucket volume of 0.75 m³ (two pumps with a capacity of 215 l/min, working pressure up to 35 MPa) and can be used to justify the choice of hydraulic fluids and maintenance intervals for hydraulic drives in construction and road machinery.

Keywords: *excavator hydraulic drive, axial piston pump, adsorbed surfactant layer, wear, volumetric efficiency, productivity*

Косолапов Віктор Борисович – канд. техн. наук., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, тел+38(097)5356478, dr.tribolog@gmail.com
Зверев Андрій Володимирович – аспірант кафедри ЕВСБДМ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, andriy.zverev@gmail.com

Стаття подана 17.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-42-58>

УДК 621.9.048

FINISHING PROCESSING OF PARTS IN A COMBINED WORKING ENVIRONMENT UNDER THE ACTION OF OSCILLATIONS. PHYSICAL PHENOMENA AND DYNAMICS OF CONTACT INTERACTION

Romanchenko O.V.

ФІНІШНА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ КОМБІНОВАНИМ РОБОЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ПІД ДІЄЮ КОЛИВАНЬ. ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ДИНАМІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Романченко О.В.

This article analyzes finishing processes using a combined abrasive medium under the action of oscillations, combining mechanical, physical, chemical, and energetic phenomena. The study investigates the physical nature of oscillation processes, the patterns of interaction between abrasive particles and the surface of workpieces, and identifies the conditions under which maximum processing efficiency is achieved. A comparative analysis of traditional finishing methods – grinding, tumble finishing, abrasive-jet machining, and vibration machining – is presented. Their advantages, disadvantages, and application limits in modern mechanical engineering are identified.

A new finishing method is proposed: machining with a combined working medium, which combines abrasive, chemical, thermal, electrical, and mechanical action. This medium consists of abrasive granules, process solutions, and process intensifiers, which, under the action of vibrations, perform a complex, deterministic circulatory motion, creating numerous micro-impacts on the surface of the workpiece. This enables cleaning, grinding, polishing, surface layer strengthening, residual stress removal, adhesion enhancement, and surface preparation for coating application. Like traditional methods, this method enables the simultaneous processing of a large number of parts, while its integrated approach allows for achieving the required surface quality in a shorter processing time.

The mechanism of contact interaction between the abrasive medium and the part surface is revealed. It is established that the process is accompanied by impact, cavitation, adhesion, wear, wave propagation, and energy dissipation. The oscillations are divided into frequency ranges, from infrasonic to ultrasonic. The effects of free, forced, parametric, and self-oscillations on the process are examined, as well as their influence

on the behavior of the working medium and the workpieces.

It is shown that the machining process is a complex vibration-impact system with distributed parameters, in which the frequency, amplitude, properties of the abrasive, part geometry, and equipment operating modes play a significant role.

The dynamic properties of the working medium are examined: circulation motion, elastic impact interaction of particles, pressure wave formation, contact processes, and deformation of surface layers. The influence of process solutions on the intensity of the process is demonstrated. Mathematical relationships describing changes in contact parameters, impact energy, particle velocity, and interaction force are presented.

The proposed approach expands the capabilities of finishing machining in mechanical engineering, particularly for parts with complex geometries and high surface finish requirements, and creates the basis for further development of technologies for machining with combined abrasive media under the action of vibrations.

Key words: *finishing processing, combined working media, oscillating processes, micro-impacts, circulation motion, technological process.*

Introduction. The creation of new and modernization of existing production systems requires complex technological preparation of production. Trends in the development of modern mechanical engineering, which will remain unchanged in the future, are the production of a wide range of products while simultaneously reducing production time and economic costs. New

enterprises for finishing, as a rule, use high-tech universal equipment in production.

Finishing is applied after mechanical and thermal treatment. The difficulties that arise at this stage of processing are due, on the one hand, to the wide range of parts being processed, and on the other hand, to the choice of processing method. Parts can have different parameters of mass and dimensions, have a complex shape. Processing methods also impose limitations, for example, the dimensions of the part may not allow processing or the technological capabilities of the equipment do not allow achieving the required process productivity in terms of quantitative or qualitative indicators.

Let's consider each of the relevant methods and analyze the general advantages and disadvantages.

The most common processing method today remains grinding or polishing with a fixed working tool - grinding wheels [1, 2]. Grinding belts, grinding heads, abrasive bars are also used as tools. During such processing, the tool performs only rotational motion, which is the main cutting motion, and the workpiece performs any motion. The advantages of this method are that it is sufficiently studied, and therefore, easy to use, high productivity, and the possibility of automating the process. Typical disadvantages include high wear of the grinding tool. The shape of the circle is disturbed, and accordingly, its grinding properties deteriorate. Errors in choosing an abrasive tool and processing modes can lead to surface damage. Also, like most of the methods that we will consider below, processing with grinding wheels is accompanied by the release of dust consisting of small particles of material, which requires additional efforts aimed at production safety.

Quite often, machine-building enterprises encounter equipment for processing in rotating drums - tumbling. Such equipment is quite simple in design and does not require complex adjustment, and the process itself is easily modeled and allows the use of combinations of various abrasive tools [3, 4]. Processing in tumbling drums is carried out due to the relative movement of the part and the abrasive tool when pouring the load mass (a mixture of abrasive granules, working fluid and parts to be processed). The speed of relative movements does not exceed 1 m/s, and the zone of intensive processing is only part of the load volume. The number of revolutions of the drum is chosen so that its acceleration does not exceed the acceleration of free fall. If the acceleration of the drum exceeds the acceleration of free fall, then processing in the drum will stop due to the fact that the centrifugal force

will press the mass to be processed against the walls, and it will rotate with it. The limitation of the use of tumbling is the processing of thin-walled and fragile parts, which can be deformed when spilled and dropped. The inner surface of the part is also not subject to processing. This is due to the fact that the relative movement of the granule, which enters the cavity of the part, stops. As a result, the granules begin to move at the speed of the part. Also, this method excludes the possibility of simultaneous processing of parts of different dimensions and mass, since during the movement a heavy part can damage a lighter one. In addition, such equipment is characterized by a high noise level during operation and limited ability to automate the processing cycle.

Jet abrasive treatment methods are also widely used - these are surface treatment methods in which abrasive particles are directed to the surface of the product using a jet of high-speed gas or liquid [5-7]. Jet abrasive treatment allows you to work with different materials and process parts with different shapes and contours, including internal areas, holes and channels. A high-speed jet of abrasive particles allows you to achieve quick and accurate removal of contaminants, oxides and other layers from the surface of products, does not create significant thermal effects, which allows you to avoid changes in the hardness or structure of the material being processed.

Jet -abrasive processing, depending on the method of feeding the abrasive tool, is divided into sandblasting, in which abrasive fine particles under high pressure are directed to the surface of the product using a gas jet, and hydrojet (hydroabrasive), in which the movement of the abrasive is carried out using a liquid. A subtype of sandblasting can be attributed to shot blasting, in which the feed is also carried out by gas, but larger elements (shot) are used as a tool.

The use of this type of processing requires detailed study of the technological process, since incorrect selection of parameters may damage the surface of the part, and the processing of thin-walled or fragile parts is even more difficult and, in some cases, not advisable, as it can lead to the destruction of the part. However, the main disadvantage of this method is its environmental friendliness and harmfulness to the operator.

One of the rather "young" methods of processing with free abrasives is the processing of parts in an oscillating tank – vibration processing, which is actively used at the stage of cleaning, grinding, polishing and other operations [8, 9]. Vibration processing is the process of removing metal from the processed surfaces of parts by grains

of abrasive granules of the working medium, which are communicated with vibrations. Processing occurs as a result of the sequential application of a multitude of micro-impacts to the surface of the processed parts by granules of the working medium when they collide with the parts and when they slide past each other under the influence of force pulses transmitted to the working medium from the vibration exciter of the vibrating machine. The main advantages of this processing method include, first of all, the ability to simultaneously process a large number of parts.

However, at present this method has acquired new properties. Today, finishing equipment in which a free abrasive medium is used that moves under the influence of vibrations, as a rule, has several sources of vibrations, which, depending on the needs, can operate in synchronous mode, which ensures uniform processing of parts in long containers. Additional sources can be located in other areas of the tank, for example, on the side walls or directly inside the tank and, by providing additional pulses, increase the contact interaction of the working medium and parts, or help change the direction of movement of the working medium. The frequencies and amplitudes that generate the main and additional sources of vibrations can be the same, or they can differ, for example, additional sources of vibrations cannot work constantly, but be turned on with a certain periodicity. The very first vibration processing operations were carried out only with the use of abrasive granules, but quite quickly, the need to use chemical solutions at the stages of cleaning and main processing became obvious. Today, processing without liquids is not considered, on the contrary, the use of chemical solutions has become a separate area of research. The same thing happened with abrasive tools. Today, for processing parts, not only the general type of tool of a certain size is selected, but also many of its other parameters - bond characteristics, type of abrasive grains, geometric characteristics of the granules (number of sharp edges, their relative location).

In conclusion, today it is appropriate to discuss the emergence of a new method - combined working environment processing under the influence of vibrations. In which the nature of vibrations, parameters of the abrasive tool, composition of chemical solutions, properties of the processed part, the feasibility of using thermal or electrical intensifiers are considered in a complex. This method combines classical vibration processing, vibrothermal, vibrochemical, vibroelectric, vibroshock and other vibration processing methods.

This method is used for cleaning, grinding, polishing, preparing the surfaces of parts for coating, removing and leveling or creating optimal residual stresses in the surface layers of parts.

The objective. Determination of physical properties and dynamics of contact interaction of the combined abrasive medium processing under the action of oscillations.

Research results. The general physical nature that characterizes the processes of processing parts with free working media under the influence of vibrations is quite complex and is associated with the phenomena of impact, adhesion, cavitation, wear, contact interaction of the processed parts, and wave processes. Processing parts with free abrasives subjected to vibrations is divided into 3 main groups: infrasonic vibrations (frequency up to 10 Hz), low-frequency vibrations (15 – 100 Hz) and ultrasonic vibrations (more than 1000 Hz).

The processing process is further complicated by the use of additional technologies that act as catalysts for the process. This effect is created by the additional influence of electric and magnetic fields, chemical solutions, low and high temperatures.

Let us consider the physical characteristics of the processing process with a combined abrasive medium under the influence of vibrations.

Mechanical oscillations. It is obvious that when creating pulses by a source of vibrations, mechanical vibrations arise, which are the main ones when processing with free abrasives. The processing process itself is directly related to general information about free and forced vibrations, the vibrational effect on the working environment, the interaction between the working environment (together with and separately from the processed parts) and the elements of the machine tools, the phenomena of self-oscillations and resonance, vibrations of mechanical systems [10, 11].

Oscillations are characterized as limited movements that are partially or completely repeated relative to some average position (state). Accordingly, systems that perform oscillations under certain conditions are called oscillatory systems. Oscillations are mechanical in the case of changes in only mechanical quantities (velocity, acceleration, displacement, pressure). In the case of oscillations with a relatively small amplitude and average frequency, they are usually defined as vibration. When processing parts with free abrasives, the oscillations of the working medium transmitted from the source are periodic, and as a

rule they are harmonic. The variable is determined by the law [12]:

$$U(t) = A \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

where A is the amplitude of oscillations, ω – angular frequency, φ – the initial phase of oscillations.

The initial phase of the oscillations is the parameter φ , and the phase of the oscillations at time t is described by the expression $\omega t + \varphi$.

The period of harmonic oscillations is determined by the angular frequency:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2)$$

in accordance

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (3)$$

Speed $V(t)$ and acceleration $\omega(t)$ in harmonic oscillations also change over time according to a sinusoidal law with the same frequency as the displacement $U(t)$, with the amplitudes and velocities being equal to $A\omega$ and, respectively $A\omega^2$.

The sum of two harmonic oscillations with the same frequencies will be a harmonic oscillation with the same frequency:

$$A_1 \cos \omega t + A_2 \cos(\omega t + \psi) = A \cos(\omega t + \gamma). \quad (4)$$

The amplitude A and phase γ of the resulting oscillations are equal to:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \psi}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{A_2 \sin \psi}{A_1 + A_2 \cos \psi}. \quad (6)$$

Mechanical oscillations that arise from the influence of forces arising in an oscillating system are free oscillations. Free oscillations are carried out in the absence of external influence, they can occur only in autonomous systems due to accumulated energy.

There is also a definition of a pseudoelastic force, which is the cause of harmonic oscillations. Pseudoelastic forces are not elastic in nature, but their magnitude is proportional to the displacement of the body from the equilibrium position. They are

always directed towards the equilibrium position. The pseudoelastic force is expressed by the expression:

$$F = -ku, \quad (7)$$

where k the coefficient of the pseudoelastic force; u – displacement, the sign indicates the opposite direction of the force and displacement vectors

It should be noted that for free oscillations, a characteristic feature is damping. Oscillations are damped if the damping is due to the simultaneous action of the pseudoelastic force and the friction force, proportional to the instantaneous velocity u :

$$F_{mp} = -ru, \quad (8)$$

In damped oscillations:

$$u = Ae^{\delta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (9)$$

where δ – is the extinction coefficient; $Ae^{\delta t}$ – is the instantaneous amplitude value; e – is the base of the natural logarithm:

$$\delta = \frac{r}{2m}, \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (10)$$

where r is the resistance coefficient; m is the mass of the oscillating body; k is the coefficient of the pseudoelastic force,

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}. \quad (11)$$

Oscillations are polyharmonic if they can be represented as two or more harmonic oscillations with frequencies that are in real proportion to each other.

Forced oscillations, unlike free ones, arise under the influence of an external force and are characteristic of non-autonomous systems. The process of forced oscillations is characterized by the phenomenon of resonance, which leads to a sharp increase in the amplitude of oscillations of a body or system. In industry, resonant oscillations can occur as a negative phenomenon and in this case, there are methods that allow you to get rid of them, but they are also used in various technological processes, for transporting something [13].

Oscillatory systems in which energy loss is supplemented by an internal source are called self-oscillating, respectively, self-sustained oscillations

in such systems are called self-oscillations. They arise from a source of energy of a non-oscillating nature that is included in the system. The occurrence of self-oscillations is possible only in non-conservative stationary systems. Usually, the phenomenon of self-oscillations is caused by the nonlinear nature of dissipative forces (friction); in the case of weakly expressed nonlinearity, the oscillations are more similar to harmonic.

If the system satisfies the condition below, then it is linear:

$$L(a_1u_1 + a_2u_2) = a_1Lu_1 + a_2Lu_2. \quad (12)$$

If the system does not meet this condition, it is non-linear. Note also that linear systems are characterized by the presence of the superposition principle.

If the system does not change in a certain period of time, then it is stationary, the same is true of oscillations, and vice versa, if the properties of the system change, then it is non-stationary. The processes that occur in stationary systems are described by differential equations with constant coefficients, and in non-stationary systems by differential equations with variable coefficients.

A system is conservative if its total mechanical energy remains constant during oscillations, otherwise it is non-conservative. Among non-conservative systems, there are systems with characteristic properties. A system is dissipative if its total mechanical energy of the corresponding autonomous system decreases.

The intensity of processes in oscillatory systems is characterized by the ratio between the measured value of the process parameter and some non-standard value that corresponds to the zero level. The intensity of oscillations is determined by:

$$\lambda = A\omega^2 / g. \quad (13)$$

If $\lambda = 1$, then this value is critical, because it is at this value that various vibrational effects occur. The logarithmic unit of oscillations is called the Bel, and its tenth part is the decibel (dB).

For a change in an energy quantity (energy, power, etc.), the logarithmic level can be represented as:

$$L = 10 \lg V / V_0 \quad (14)$$

where V_0 is the value corresponding to the zero level.

When changing oscillatory displacement, velocity, or acceleration, the logarithmic level is equal to:

$$L = 20 \lg a / a_0 \quad (15)$$

where a_0 is the initial value of the parameter a , which corresponds to zero level.

If $V = const$ and a^2 , expressions 14 and 15 are equivalent. Usually, the initial value a_0 is equal to the acceleration of free fall.

Parametric oscillations occur in linear and nonlinear systems. They arise as a result of the variability of the elastic force coefficients. An example of the simplest model of parametric oscillations is a pendulum with a pivot point.

Deformation of working media under the influence of periodic oscillations occurs according to rheological laws [14]. However, the main difference in the rheology of such media is that all rheological bodies simultaneously have basic and inertial properties. The presence of inertial properties of bodies is due to changes in accelerations during periodic loads, as a result of which significant inertial forces arise.

Wave phenomena. When vibrations affect media and bodies placed in them, the phenomenon of wave processes occurs. Such processes are characterized by characteristic regularities, which include refraction, diffraction, interference, reflection, refraction and the Doppler effect. [15].

Regarding the processes under consideration, it is appropriate to clarify that in this context, waves of mechanical origin are considered, which have the usual kinematic characteristics (velocity, acceleration, displacement). The speed of wave propagation depends on the medium. The movement of waves is carried out according to the law of refraction [15, 16].

As the distance increases, the vibrations of the particles of the medium that occur during the passage of waves decrease. This occurs as a result of the absorption of wave energy by the medium. The propagation of waves depends on refraction, which is significantly affected by the heterogeneity of the medium. [15, 16].

The state of the medium in which waves propagate has a direct impact on the dynamic properties of the waves. Thus, the theory of wave propagation allows us to study changes in the nature of wave propagation depending on the properties and state of the medium and the influence of waves on changes in the state of the medium itself [15, 16].

The study of wave processes that arise during oscillatory phenomena is associated with the periodic and non-periodic influence of exciting forces. The latter characterizes shock processes, in which the action of the excitation is limited, and the oscillations generated by the shock decay over time. Such oscillations are called non-stationary [19, 21].

Special attention should be paid to wave reflection, because under certain conditions the shape of a wave propagating in an elastic medium may change. In addition, some waves propagate more easily on the surface of the body, while others propagate more easily inside the body [16, 19].

The propagation of elastic waves in long bodies, for example, in rods, the dimensions of which are larger compared to elastic displacements, and have large internal damping properties, is due to the damping of the elastic wave before it is reflected from the fixed boundary to the excitation source [18, 20]. Such waves can be called “impulsive”, that is, the excitation has no time limits and manifests itself periodically. In other words, we consider special forced oscillations in which the frequency is much higher than the fundamental natural frequency of the oscillating system. In this case, the oscillation frequency is greater than all natural frequencies of the system and, accordingly, there are no forms that can fall into resonance. In the case under consideration, the induced oscillations are understood as a movement that occurs under the action of excitation, the existence of which does not depend on the possibility or not of transmitting motion to the system. That is, the excitation does not depend on the presence or absence of oscillations of the excitation system, and this excitation can be harmonic or random in nature [20].

The efficiency of the impulse wave increases with an increase in its energy component, which occurs with high-frequency oscillations (ultrasonic oscillations) [17, 20]. As is known, the power transmitted by a wave of a given amplitude through a unit plane is proportional to the square of the frequency, therefore, by focusing the power of the ultrasonic beam, we will obtain high-frequency oscillations that cause deformation or destruction, which in turn is the basis of processing processes.

Wave processes associated with shock processes are complex, which is due to the different reaction of materials to shock loads in contrast to static ones, because such properties as the speed of wave propagation or the density of the material are of little importance for slow loads and, conversely, play a major role for shock loads [21]. The magnitude, duration and distribution of forces are largely determined by the reaction of the material

and the shape of the body to which the shock load is applied. The distribution of stresses that occurs under the action of this load is both localized and mobile. The action of the load is not transmitted to the entire body instantly; at the beginning, some of its areas remain unexcited. In this case, stresses and deformations move in the body in the form of waves. In metals, this speed reaches several thousand meters per second. After the end of shock phenomena, the body can return to its original state or undergo irreversible changes (elastic or plastic impact).

Depending on whether the direction of motion of the particles of the body coincides with the direction of wave propagation or occurs perpendicularly to it, two types of elastic oscillations are distinguished: longitudinal waves (longitudinal excitation, expansion wave, primary wave), transverse waves (shear wave, secondary wave). Longitudinal waves propagate in the material by compression and stretching, and transverse waves by shear displacements [15, 16, 18].

As stated in the theory of elasticity, the speed of wave propagation depends on the elastic constants E , G and the density ρ [16, 18]. For a cylindrical rod it is determined by the formula:

$$a = \sqrt{E / \rho} \quad (16)$$

From a physical point of view, the formation and propagation of a wave in a metal rod occurs in the following order: the shock wave N instantly loads the end of the rod F ; during the time dt that has passed since the moment of impact contact, only a certain layer of the rod dl will have time to compress, the rest of the rod will remain undeformed and, accordingly, without stresses. The relative reduction of the first layer will be:

$$E = \frac{du}{dl} \quad (17)$$

The formation of stress waves that arise as a result of a perfectly elastic impact, there is a separation of the impact energy into kinetic and potential forms. This applies to both compression waves and tension waves. The process of converting kinetic energy into potential energy is sequentially distributed to adjacent layers of contacting bodies, as a result of which the deformation spreads in the rod from one cross-section to another [19, 21].

For processes in which mechanical vibrations are used, the basis is the physical state of the

abrasive media and the nature of the interaction between the media and the parts being processed.

Vibrations can be transmitted directly to the workpieces by external influence, for example, through special applications. Providing vibrations or movement to the workpieces allows to intensify the machining process, to ensure uniform machining and transportation of the part. Such solutions can be used to solve both a single problem and in complex solutions.

Individual vibrations with a frequency and amplitude other than the operating frequency can be transmitted directly to the working environment.

Processing with combined abrasives affects the internal structure of the part, changing its physical and mechanical properties. Under the influence of vibrations in the processed parts and the environment itself, primary deformation waves arise in the place of transmission of the primary impulse from the working body, which transmit force impulses to the subsequent layers of the working environment. The forces of friction, inertia, deformation processes of the material of the parts and the environment affect the transmission of impulses and they gradually become weaker. That is, the effect of energy dissipation is observed [20, 21].

The effect of vibrations largely depends on the characteristics of the combined abrasive medium, namely the dispersion of particles and the state of the working medium as a whole.

Dynamic properties of systems under the action of oscillations. The main characteristics of technological processes in which vibrations are used as a source of energy for the movement of combined abrasive media include: amplitude-frequency characteristics, geometric and physical parameters of the abrasive tool, machined parts and equipment [21].

The technological system of processing with a combined working material under the action of vibrations is an oscillatory-impact system with distributed parameters and impact pairs of unstable structure [20, 21].

When using combined abrasives on equipment with a classical layout scheme, the tank moves with an acceleration $A\omega^2$, the value of which is in the range of 1.5 – 2.0 g, while the working medium performs a circulation movement at a speed of 0.2 – 0.9 rpm in the plane of rotation of the unbalances and in the opposite direction relative to the shaft of the source of vibrations. The vibration speed of the abrasive particles consists of movements transmitted from contact with the tank and relative shock movements in the medium with a frequency

of ω 0.8 – 1.0 m/s. It should be noted that the acceleration and speed indicators presented above are currently basic, and in modern equipment they can be much higher [21].

The movement of particles under the influence of vibrations transmitted from the tank is characterized by the occurrence of dissipative processes, the presence of gaps between the particles and the tank walls, and elastic-impact processes. During one oscillation cycle, the particles of the working medium simultaneously collide and move away from the tank walls, the working medium can periodically compress or expand and move together with the tank [21].

The maximum effect of vibrations transmitted to the working medium is observed directly near the walls of the tank and decreases with distance from it. Figure 1. shows the pressure distribution depending on the tank area. In this case, a diagram of classical equipment with a U-shaped tank and the location of the source of vibrations in the lower part is shown. Of course, the location of the source or sources of vibrations significantly affects the pressure distribution and, accordingly, the productivity of the processing process [22].

Considering the above diagram, it is noticeable that the working medium is conditionally divided into two layers - the first layer is in contact with the reservoir and is maximally active, and the second can only contact the parts being processed. The general rotational motion of the working medium, which consists of a combined abrasive material, parts being processed and chemical solutions, is opposite to the vector of the exciting force created by the source of vibrations.

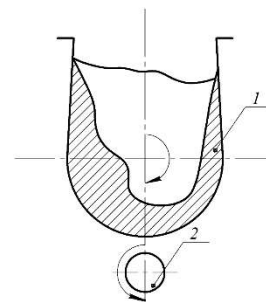


Fig. 1. Pressure distribution in the tank:
1 – zone of maximum pressure;
2 – source of oscillations

Oscillations (vibrations) and variable accelerations of abrasive particles exert a dynamic effect on the surface of the parts being processed due to the combination of micro-impacts of both individual and groups of particles.

The movement of parts in the flow of the working medium can be of a diverse nature. When loading parts into the working medium without fixing, they can change their positioning, oscillate with the working medium and perform rotational movements. The properties of the movement and the speed of movement of the processed parts depend on their geometric dimensions, shape and mass. [22].

Processing with a combined working material is carried out without a rigid kinematic connection between the machine tool, the tool and the workpiece, due to which the working medium acquires the properties of fluidity and flexibility, which allows the tool to contact the entire surface of the part regardless of its geometric parameters.

General characteristics of oscillatory processes. Oscillating processes of processing with combined working media are complex and multifactorial, but they have common characteristics for a wide range of vibrations. When processing with a combined working tool under the influence of vibrations, the frequency range is quite wide and includes both low-frequency mechanical vibrations and high-frequency vibrations, respectively, the amplitude of vibrations decreases with increasing frequency. The transfer of energy under the influence of vibrations is carried out stepwise, and has basic and driving relationships. Thus, it is advisable to consider the processes of surface processing with a combined working material under the influence of vibrations from the standpoint of classical physics and quantum mechanics [18, 20].

The characteristics of vibration systems intended for processing with a combined working medium are as follows: source(s) of vibrations; sources of additional vibrations, working medium in which the combined abrasive tool acts on the surface of the object to be processed by transferring vibration energy from the energy source to the abrasive tool; absence of rigid fastening of the abrasive tool; directly the abrasive tool, which is a combination consisting of an abrasive component(s) and a bond and has various shapes; amplitude-frequency characteristics; devices designed to orient parts, influence the pressure indicators of the working medium or the directions of its movement [18, 20].

In general, vibrational processes of combined abrasive processing are used in solving the following technological areas: the effect of vibrations on dispersed systems; immersion of vibrational elements in a continuous medium; cutting processes; grinding of materials.

This allows solving technological problems of separation of multiphase media, micro-cutting of the surface and direct cutting, changing the shape, grinding, improving the physical and mechanical properties of the surface and the interior of the material of the parts, and also allows creating a transporting effect.

It should be noted that some types of oscillations are poorly studied and their application is limited, moreover, in a number of cases they have a negative impact on the system. These include low-frequency oscillations in the range of 10 – 15 Hz, they have great destructive power, and the study of their nature is mainly aimed at finding methods for preventing and combating them. But, despite the complexity of the application, such oscillatory processes are used in the field of seismology, metallurgical and chemical industries.

Oscillating processes with a frequency range of 15 – 300 Hz have a much wider scope of application. Processing with a free abrasive tool with oscillations of this frequency is used in machine-building, instrument-making, agricultural, mining, medical and environmental sectors of the modern industrial complex [18, 20].

Subsequently, ultrasonic technologies that use vibrations with a frequency above 20,000 Hz have received significant development. This is explained by the fact that, in comparison with other frequency spectra, in the ultrasonic range it is possible to obtain directed radiation (impact), which can be focused on a specific area and obtain powerful energy pulses. Such technologies are used for cutting of superhard materials and in the medical field for cleaning [17].

The issue of using vibrations with different frequency and amplitude characteristics requires special attention. Some technological processes are sufficiently studied and allow achieving the desired result by using a combined abrasive tool and vibrations of a fixed frequency and amplitude, which in most cases is the most appropriate, since it allows obtaining high surface quality indicators at minimal economic costs. At the same time, the processing process is highly deterministic and quite simple.

At the same time, when processing complex parts of complex shapes with internal cavities, ensuring the quality of processing usually requires non-standard technological processes, and in this case the processing process can be carried out using several sources of oscillations [11, 20]. The sources of oscillations can be located in different positions and create oscillations of different frequencies and amplitudes, some of them can operate continuously

and in-phase, while others create oscillations of a different nature (with a larger amplitude and a lower frequency or vice versa), thus providing, for example, a local change in the direction of movement of the working medium, or a temporary decrease or increase in the speed of movement of the entire load mass. In some cases, it is advisable to create a single high-amplitude pulse after a certain period of time, for example, to change the orientation of parts in the working medium.

Mechanics of interaction of combined working environments and parts. The process of machining with a working tool without a rigid kinematic connection is characterized by many mechanical and chemical phenomena, which are due to the variety of abrasive tools, characteristics of the parts being machined, equipment modes, and chemicals [23, 24]. Also present are processes of plastic deformation, friction, thermal and chemical phenomena, processes of adhesion and chemical interaction, and the action of electric and magnetic fields [23].

Analysis of the interaction of the abrasive medium and the processed parts allowed us to determine the technological properties of the processing process under the influence of vibrations of various nature. Special attention is required to study the process of contact interaction between the elements of the combined abrasive medium and the processing objects, which includes point (local) contacts and their integral manifestation, the consequences of micro-cutting and deformation processes, the characteristics of the abrasive itself and the processed material [24].

The interaction of the elements of an abrasive tool as a single medium under the action of vibrations is a dynamic process with the corresponding parameters of displacements and force actions. The abrasive medium together with the processed parts under the action of external vibrations, which are created by sources with imbalances and transmitted from the walls of the working chamber, performs a complex circulatory movement, during which the movement of both the abrasive medium and the parts in it occurs, oscillations of both the entire load mass and individual elements, relative displacements, angular rotations and impact processes [23, 24]. The interaction of single and many repeatedly damped collisions determines the level and nature of the dynamic impact on the formation of the surface being processed and on the processing process as a whole.

In general, the process of processing with combined abrasives has many common features

with the process of grinding by vibration, and some process patterns, such as circulation movement and design features of the equipment, are of the same nature and are valid for both processes.

The movement of the working medium is circular and is characterized by angular velocity φ , linear velocity v and cycle velocity, direction of circulation. Such a movement process is deterministic and ensures uniform contact interaction of the particles of the working medium with the surface of the processing object, which is due to the non-coincidence of the coordinates of separation and contact of the medium with the walls of the working chamber, which oscillates from cycle to cycle. The time of movement with separation (per oscillation period T) increases with increasing oscillatory accelerations $A\omega^2 > g$, and $A\omega^2 > (8-10)g$ is equal to $t_0 = (0,8-0,9)T$. At the same time, the time of joint movement of the medium and the walls of the working chamber decreases from $t_0 = T$ (provided $A\omega^2 > g$) to $t_0 = (0,1-0,2)T$ (provided $A\omega^2 > (8-10)g$). With increasing $A\omega^2 > g$ the difference in the coordinates of separation and contact also increases. The slippage of particles of the abrasive medium at the moment of contact with the walls of the working chamber is less than the value of the cycle movement, S_T which is determined by the difference in the phase angles of separation φ_0 and contact φ_τ :

$$S_T = A \cdot (\cos \varphi_0 - \cos \varphi_\tau) \cdot \frac{\lambda}{2 - \lambda} \cdot \frac{1 - R^*}{1 + R^*} \quad (18)$$

where A – amplitude of oscillations of the working chamber; $R^* = (0.15 - 0.25)$ – coefficient of recovery upon collision of a column of medium particles with the wall of the working chamber; λ – coefficient of viscous impact friction. Linear circulation velocity $V_C = S_T \cdot \omega$, angular velocity $\varphi = \frac{S_T \cdot \omega}{R_C}$, where R_C – radius of the circulation surface.

The greatest height of the circulating movement of the working medium is determined taking into account the pushing force from the vibration transport force:

$$F_C = \frac{\lambda}{2 - \lambda} \cdot \frac{1 - R^*}{1 + R^*} \cdot \frac{m \cdot l \cdot a \cdot g}{D^2} \cdot \text{ctg} \beta \quad (19)$$

where m , D is the mass and diameter of the medium particle; l , a is the length and width of the transporting layer of the working medium; β is the angle of onset of slipping of the medium particles relative to the working chamber during oblique collision.

The pushing force is capable of lifting a column of particles with a total mass of:

$$G_{\Sigma} \leq F_C \tag{20}$$

to the height H_C .

Number of particles in the column:

$$i = \frac{h}{D} \text{ and } i = \frac{G_{\Sigma}}{m};$$

$$H_C = \frac{\lambda}{2-\lambda} \cdot \frac{1-R^*}{1+R^*} \cdot \frac{m \cdot l \cdot a \cdot g}{D^2 \cdot G_{\tau}} \cdot \text{ctg} \beta \tag{21}$$

where G_{τ} is the mass of the working medium particle.

The periodic transfer movement of the working medium is accompanied by periodic collision with the frequency ω and is characterized by the displacement angle φ , the angles of collision with the processing object φ_k and the working chamber φ_g and provides its energy properties.

The multiplicity of particle oscillations is equal to unity, with an increase in the intensity of accelerations, $A\omega^2 > 1g$ the value of the phase angle of collision of the working medium with the walls of the working chamber φ_{τ} increases from 90 to 340 and reaches maximum values at $A\omega^2 > (8-10)g$. It should be noted that in this range, larger values φ_{τ} correspond to smaller values of oscillation frequencies. With an increase, $A\omega^2 > 1g$ the phase angle of separation φ_0 gradually decreases from 90 to 20 - 30 and reaches minimum values at $A\omega^2 > (8-10)g$. The interval of movement of the working medium between φ_{τ} and φ_0 reflects the duration of the separation movement:

$$t_0 = \frac{T \cdot (\varphi_{\tau} - \varphi_0)}{360^{\circ}} \tag{22}$$

The duration of the joint movement determines the ratio:

$$t_0 = T \cdot \left(1 - \frac{(\varphi_{\tau} - \varphi_0)}{360^{\circ}} \right) \tag{23}$$

The phase angle of contact of the medium with the surface of the working chamber can be represented in the following form:

$$\varphi_{\tau} = \theta + \left[\arcsin \left(\frac{z^*}{\sqrt{1 + \Phi \omega}} \right) - \text{arctg} \Phi \omega \right] \tag{24}$$

In this case, the phase angle of separation of the working medium layer from the chamber surface will take the form:

$$\varphi_{\tau} = (180 + \theta)^{\circ} + \left[\arcsin \left(\frac{z^*}{\sqrt{1 + \Phi \omega}} \right) - \text{arctg} \Phi \omega \right], \tag{25}$$

where $\theta < z^* < 1$ is the value of the dynamic gap, Φ is the functional that takes into account the oscillatory mobility of the medium; θ is the position angle at which the circulation is measured.

When increasing $A\omega^2$ from 1 to 10 g, the range of change is $\approx \pi$, the range of change φ_{τ} is $\approx 3\pi$, which is explained by the influence of counter-oscillations of the working environment.

Relative movements of particles of the working medium under the action of vibrations occur with a personal frequency ω_0 and characterize its mobility, ensuring dynamic contact of the particle with the surface of the part or parts being processed.

The behavior of a system of particles of a working medium under the action of vibrations can be partially described using the theory of semi-plastic collision with repeatedly decaying co-collision. The value of the equivalent coefficient of recovery of the co-collision velocity (taking into account the added mass) for some types of media is equal to [23]:

$$R_E = (0,1 - 0,25)R \tag{26}$$

This value reflects the ratio of the velocities of the centers of mass of the boundary layer of a group of abrasive particles before and after the collision. With a small thickness of the boundary layer, this ratio may be violated due to the fact that the velocity after the collision of the particle and its subsequent separation, for example from another particle or part, may be higher than its velocity before the collision.

The thickness of the boundary layer, in which repeated, decaying collisions between particles occur in an active form during the collision cycle before the start of joint motion with the processing object, is characterized by the number of particle layers and is determined by the following expression:

$$n = A\omega \cos \varepsilon_r [0,5D \cdot (P-1)]^{-1} \quad (27)$$

If $R = 0,8 - 0,9$ the duration of the collision cycle significantly exceeds the collision time of a single particle.

$$t_r = \frac{V_g - \lambda V_c}{2g\lambda} \quad (28)$$

The vibrational mobility of individual particles is determined by their individual vibrational frequency ω_0 and the probable value of their amplitude of vibrational displacements a_1 before collision:

$$a_1 = 0,25D \cdot \omega_0^2 \frac{P-1}{g}, \quad (29)$$

where D is the particle diameter.

In a real system, there are always contact impacts of particles of the medium with the workpiece and with each other which repeat and subside.

In the absence of rotational velocity, single contacts of particles with the surface of the part create elastic-plastic deformation [23, 24]. The nature of such interaction can be described by the following types of mutual displacements: partial displacement of bodies upon contact, particle repulsion, particle failure with sliding without or with rotation.

Deformation processes. Processing with a combined working medium is intended to obtain a strengthening or stabilizing effect, which is carried out mainly in the environment of metal and hard alloy bodies [25]. Obtaining the specified technological effect, the ability to control the process are determined by the state of the processing medium and its properties, which include the value of the equivalent mass of the medium under the action of vibrations, the recovery coefficient, the parameters of the force connection, the dynamic gap between the particles of the medium, dissipative and elastic properties [25, 26].

Under the action of vibrations, the behavior of the working medium can be considered as the behavior of a rheological body. When a load is applied to such a body, a deformation occurs, which decreases to zero in its absence, while the stresses decrease over a certain period of time t_{with} [25]. Separately, one should consider the type of collision in which there is a flow around the source of momentum by the working medium. With this type of contact interaction, during the collision time period, there is a large number of particles that perform many repeated damped collisions with each other and with the surface of the part [25, 26]. The collision time for a single particle of the medium is $\tau = 0,001 - 0,005$ s, while the coefficient of velocity recovery during collision is equal to $R = 0,6 - 0,8$. Over time, when the strength of the treated surface increases, the value τ decreases, and R vice versa increases. The duration of repeatedly damped collisions of a group of particles with the surface of the part is 10-20 times greater and is 20 – 40% of the oscillation period [25], such a significant duration is explained by the fact that a large number of particles participate in the collision. Analysis of the impulse effect in such a collision shows that at a collision speed of $V > 0,7$ m/s and moderate loosening, $1,0 < K_w < 1,2$ an intensive increase in the force impulse and the development of the impact are observed, characteristic of a viscoelastic body [25, 27]. At small values of loosening $V < 0,5$ and at significant loosening, $K_w < 1,2$ the force impulse increases slowly, and the nature of the dependence $F(t)$ acquires a character that corresponds to the dependence (t) for an elastic-plastic body.

During a collision, the development of the force impulse is delayed; when the deforming load is removed, the medium is completely restored, and the stresses

are extinguished in several oscillation periods and collision cycles [25, 26, 28]. The numerical value of the damping coefficient for a viscoelastic system can be represented by the following expression:

$$b = \alpha_+ (2\sqrt{mG_+})^{-1} \quad (30)$$

As mentioned above, the working medium under the action of vibrations performs circulation and translational periodic movements. In this case, the particles in the medium perform relative oscillatory movements, and the technological fluid - circulation and pulsation in the gaps between the particles [25, 26]. The angular rotation of the

particles as a result of collisions at an angle decreases to zero until the next collision cycle due to the absence of gaps between the particles

In the process of interaction of the medium with the workpiece under the action of vibrations, there are both instantaneous properties of the collision of individual particles and integral properties of the particle system [25, 27]. Relative movements of particles in the working medium occur with a frequency ω_0 , ensuring its mobility and contact with all elements of the machining surface [26]. Circulating and pulsating movement of the technological fluid between particles of the working medium helps to reduce friction forces in the contact zone with the machined surface and ensures the removal of wear products (particles of the medium and the workpiece) [26, 28]. The duration of the separation and joint motion of the medium can be determined using the following expressions (respectively):

$$t_S = \frac{T \cdot (\varphi_\tau - \varphi_0)}{360^\circ}, \quad (31)$$

$$t_C = T \cdot \left(1 - \frac{\varphi_\tau - \varphi_0}{360^\circ}\right). \quad (32)$$

The behavior of a spatial system of vibrating particles under the action of oscillations can be described by the theory of pseudo-plastic impact with repeated damping collisions [25, 27]. In this case, the velocity recovery coefficient will be equal to [27]:

$$R^* = \frac{(\mu R - 1)^2 + \mu \cdot (1 + R^2) \cdot \cos \tau_{-3}}{(1 + \mu)^2}, \quad (33)$$

Where

$$\mu = \frac{m_1}{M_2} + \frac{m_1}{M_3} + \frac{m_1^2}{m_2 M}; \quad (34)$$

$$\cos \tau_{-1} = \frac{1 + \mu R}{1 + R}$$

The thickness of the boundary layer, in which re-quenching collisions between particles are actively realized during the collision cycle before the beginning of the stage of their joint movement, is characterized by the number of particle layers [25, 26], which is determined by the ratio:

$$n = A\omega \cos \varepsilon_\tau t [0,5D \cdot (P-1)]^{-1} \quad (35)$$

Under the conditions $R = 0,6 - 0,8$, $R^* \approx 0,1 - 0,2$, the duration of the collision cycle is found by expression (41) to significantly exceed the collision time of one particle.

$$t_\tau = \frac{V_g - \lambda V_{-2}}{2g\pi} \quad (36)$$

Within the oscillation period, the particles of the working medium are alternately in two states - in dense and loose packing, while the total porosity of the medium is 26%, and the area of the gaps in the cross section is 9,3% [25]. The coefficients of porosity and gaps are 0,26 and 0.093, respectively. The coefficients for the medium in the dynamic state are calculated by the formula:

$$\begin{aligned} K_{Por} &= 0,259(P-1), \\ K_{Gap} &= 0,2093(P-1) \end{aligned} \quad (37)$$

A technological solution periodically flows through the working medium in a pulsating flow with an oscillation frequency at a speed of:

$$V_{TP} = \frac{\Delta P D^2 C}{l\mu}, \quad (38)$$

where ΔP – pressure drop; μ – dynamic viscosity of the liquid; l – filtration length; C – Slichter index for the cross-section of the gaps. For steel balls with a diameter of 5–6 mm, the vibrational viscosity at $A\omega^2 = 8-10g$, is equal to $\mu = (3-4)$, and at $A\omega^2 = 4g$ is equal to $\mu = (7-10)$. The Reynolds number for the medium under the action of vibrations at $A\omega^2 > (6-10)g$ is determined by the formula (44) and varies in the range 25 – 100.

$$R_1 = \frac{3\pi A\omega D^2 \rho}{\alpha}, \quad (39)$$

where D, ρ is the diameter and density of the working medium particles; α is the resistance coefficient of the medium. The movement of the technological solution through the gaps of the working medium reduces the vibrational mobility of particles by up to 30% [25, 27].

As noted earlier, under the action of vibrations, the medium contacts the surface of the workpiece and periodically, upon contact with it, forms

on the surface there are many traces of processing, which over time as a result of repeated

superposition and overlap form a new surface. The spatial model of the system that implements the processing process can be represented as a chain of concentrated masses m_n , which contain elastic-viscous and intermediate elements C_T , α and δ , which for a period T sequentially and alternately contact the surface of the part and the tank. The decisive role in the process of surface formation is played by the collision itself, the circulatory movement of the working medium does not have a significant effect on the magnitude of the collision [25, 26]. The equation for determining the maximum collision force [29]:

$$F_{\max} = \frac{m_n \omega_{02}^2 X_3 K_\beta \sqrt{1-n_2^2}}{e^{-n_2 \omega_{02} t_\tau} \sin(\omega_{02} t_\tau \sqrt{1-n_2^2})}; \quad (40)$$

The duration of the collision cycle is equal to

$$t_\tau = \frac{\pi}{\omega_{02} \sqrt{m_n c_2}}; \quad (41)$$

At the same time

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{m_n}{c_2}}; \quad n_2 = \frac{\alpha_2}{2\sqrt{m_n c_2}}, \quad (42)$$

where K_β is the coefficient of the viscoelastic model.

When studying the features of the formation of the surface layer of the medium, an important role belongs to contact phenomena in the collision zone of both individual particles and their groups, and circulation movement is also taken into account. In this case, the effect of oscillatory transportation occurs, which causes circulation movement of the boundary layers of the working medium, which is determined from the expression [29]:

$$F_{CM} = \frac{\lambda}{2-\lambda} \cdot \frac{1-R^*}{1+R^*} \cdot \frac{m \cdot l \cdot d \cdot g}{D^2} \cdot ctg \alpha, \quad (43)$$

where R^* is the velocity recovery coefficient for a group of particles.

Gravitational forces affecting the working environment during oscillatory movement:

$$Q = p \cdot g \cdot h \cdot s \quad (44)$$

The force of resistance to the relative motion of the working medium

$$T = \alpha^* V, \quad (45)$$

where ρ – bulk density of the working medium; h , s – height and cross-sectional area; α^* – coefficient of internal resistance of the working medium when using steel balls with a diameter of 5 – 6 mm as an abrasive filler.

If $A\omega^2 > (6-10)g$ $\alpha^* = 0,1-0,2$. The initial oscillatory displacement is determined by the average velocity of oscillatory transport:

$$S_T = A(\cos \varepsilon_0 - \cos \varepsilon_\tau) \cdot \frac{\lambda}{2-\lambda} \cdot \frac{1-R^*}{1+R^*} \cdot ctg \quad (46)$$

where ε_0 and ε_τ are the phase angles of separation and collision.

The momentum of the force upon collision of a part (M) and a particle of the medium (mass of the particle m_2) is equal to:

$$I_2 = \frac{2m_2 A \omega \cos \varepsilon_2}{0,5 - \psi(T) - \psi(0,5T) - 2(R+1)}, \quad (47)$$

where ε_τ – the phase angle of collision, which is determined by the expression

$$\varepsilon_2 = \arcsin \frac{\delta}{2AV1 - \Phi \omega} - \arctg \Phi \omega + \pi, \quad (48)$$

where Φ – the function of the vibrational mobility of particles, which is equal to

$$\Phi = \frac{\psi(T) + \psi(0,5T) - \psi(0,25T)}{0,5 - \psi(T) - \psi(0,5T) - 2(R+1)}, \quad (49)$$

where m_τ is the mass of particles that participates in repetitively decaying collisions during the collision cycle.

The path of movement of the part during the collision:

$$S_g = V_0, \quad (50)$$

Number of particles in the collision group:

$$n = K_n V t_\tau [0,5D(P-1)]^{-1}, \quad (51)$$

where K_n – the number of granule particles that collide with the part; t_τ – the collision cycle time;

P dynamic loosening of the medium; D – the diameter of the particle (granule).

$$m_{\tau} = 4 \cdot V \cdot \tau^2 (G \cdot \tau + \alpha) \cdot [R \cdot D(P-10)]^{-1}. \quad (52)$$

Let's take into account the mass of technological solutions m_{ts} :

$$m_{ts} = \frac{n \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^3}{g(P-1)}, \quad (53)$$

after which we get

$$m_E = m + \frac{\rho \cdot D^2 V \cdot \tau}{g(P-1)} \cdot \frac{4 \cdot V \cdot \tau^2 (G \cdot \tau + \alpha)}{R \cdot D \cdot (P-1)}, \quad (54)$$

where m and D are the mass and diameter of the particle; ρ is the density of the technological solution; V – collision speed.

A significant factor in shaping the surface of the workpiece is the energy index of the collision of the workpiece with the working medium (E), which is determined by the formula:

$$E = \frac{m(A \cdot \omega \cdot \cos \varepsilon)^2 \cdot (1 - R^2)}{0,5 - \psi(T) - \psi(0,5T)}, \quad (55)$$

Taking into account the collision energy indicator, the following equations are used to calculate the quality of the surface layer of the part [25, 26, 29]:

microrelief height

$$R_z = \left[R_z - \sqrt{\frac{23}{\pi DHM}} \right] R_z(n); \quad (56)$$

Hardness

$$HV = \left[\sqrt[4]{\frac{32E}{\pi D^3 HM}} \cdot 100\% \right] HV(n); \quad (57)$$

Depth

$$h_{\mu} = \left[1,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{32ED}{\pi HM}} \cdot (1,54 - 10^{-3}) \right] h_{HV}(n) \quad (58)$$

Average value of normal compressive stresses

$$\sigma = \left[0,481 \left(\frac{E}{(r^*)^3} \right) \right] K_{\mu D}^{0,8} \cdot \sigma(n); \quad (59)$$

$$K_{\mu E} = \left(\frac{1 - \mu_d^2}{E_d^2} \right) + \left(\frac{1 - \mu_g^2}{E_g^2} \right), \quad (60)$$

where D – particle (granule) diameter; HB , – HM Brinell and Mayer hardness of the material; $R_z(n)$, $HV(n)$, $hHV(n)$, $\sigma(n)$ – functionals of the initial change in the corresponding parameters due to repeated many times combined plastic impressions; $r^* = r_d \cdot r_g / (r_d + r_g)$ – radius of contacting surfaces; R_z^* – basic surface roughness; μ_d , E_d – Poisson's ratio and Young's modulus of the part; μ_g , E_g – Poisson's ratio and Young's modulus of the granule.

The parameters of the collision of particles of the medium with the processed parts can be determined in another way [25, 27], for example, the velocity of a particle (granule) of the medium is equal to:

$$V_{gve} = V_{os} \cdot K_V, \quad (61)$$

where V_{os} is the speed of movement of the surface transmitting vibrations; K_V is the coefficient of speed that decreases with distance from the surface transmitting vibrations.

Expressions (62), (63) allow us to determine the collision force from the collision duration τ :

$$F_{E1} = \frac{K_d m_g V_{gve} (1 + K) \cdot K_l K_{\alpha} K_m}{10 \cdot \Delta t \cdot K_{\tau}}, \quad (62)$$

$$F_{E2} = \frac{K_d m_g V_{gve} (1 + K) \cdot K_l K_{\alpha} K_m}{10 \cdot \Delta t \cdot K_{\tau}} \cdot \frac{m_d}{m_g + m_d} \quad (63)$$

where K_{α} is the coefficient of the angle of contact of the pellet with the treated surface; K_l is the coefficient of the distance to the surface transmitting the vibrations; τ is the duration of the collision; K_{τ} is the coefficient of the duration of the collision; m_g and m_d is the mass of the pellet and the part.

$$\tau = A \omega^K \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E^2} + \frac{1 - \mu_2^2}{E^2} \right) K^{0,8} t, \quad (64)$$

where t – the cycle time (period) of the collision of a group of granules, $t = R^* \cdot n(t)$.

To determine the recovery factor, we use the equation:

$$R = \sqrt{1 + \frac{T}{\frac{V_{gwe}}{\Phi} \sqrt{\frac{D_g}{4\omega} \sqrt{\frac{\rho(1-2\mu)}{Et_p}}}}}, \quad (65)$$

where Φ – the criterion for the convergent Fourier series; ρ – the density of the granule material; ω – the ability of the material of the workpiece to transfer temperature; t_p – the relative length of the surface roughness profile.

The result of deformation processes during processing with a free working medium is influenced by such parameters as the variable value of the angle of contact and the coefficient of velocity recovery, the difference in the initial roughness of the surfaces of the granule and the part and the coefficient of friction, material, dimensions and shapes. To increase the accuracy of the calculation, it is necessary to take into account friction during oblique collisions, and a change in the roughness and hardness of the surface layer affects the coefficient of velocity recovery during collision.

In particular, when a granule collides with the sample surface, the value of the velocity recovery coefficient upon collision R for different values of the collision angle is

characterized by dependence:

$$R = \sqrt{H_{up} / H}, \quad (66)$$

where H is the distance of the pellet's fall; H_{up} is the height of the pellet's rebound.

Conclusions. The physical nature of the process of machining with a combined abrasive medium under the action of vibrations is considered. The process is characterized by a complex interaction of mechanical, wave, thermal and chemical phenomena, which form a new structure of the surface of the part.

Combined abrasive machining is an oscillatory-impact system with non-stationary dynamics. The influence of external and internal oscillations causes the appearance of self-oscillating and resonant effects, which can be used to increase the productivity of the machining process.

The given ratios allow us to determine the impact forces, collision energy, velocity recovery coefficients, and damping.

It has been established that the efficiency of the process largely depends on the composition and

condition of the combined working medium – the parameters of abrasive granules and technological solutions.

The use of multiple vibration sources with different parameters allows for local regulation of the movement of the medium, ensuring the required processing quality even in hard-to-reach areas.

The proposed processing method combines vibrational, mechanical, chemical, electrical and thermal effects on the surface of the part being processed. The method allows to ensure high accuracy, surface cleanliness and material strengthening while reducing energy and time costs.

References

1. Malkin S., Guo C. *Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives*. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2008. 372 p.
2. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton / Marinescu I.D. and others. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006. 750 p.
3. Fang X., Wu C., Liao N., Yuan C., Xie B., Tong J. The first attempt of applying ceramic balls in industrial tumbling mill: A case study. *Minerals Engineering*. 2022. Vol. 180.
4. Iwasaki T., Yamanouchi H. Ball-impact energy analysis of wet tumbling mill using a modified discrete element method considering the velocity dependence of friction coefficient. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 163. P. 241–247.
5. Tshimanga N., Combrink G., Kalenga M. Surface morphology characterization of grade 304L stainless steel after abrasive blasting. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38, No. 2. P. 544–548.
6. Jerman V., Zelenák M., Lebar F., Foldyna V., Foldyna J., Valentinčič J. Observation of cryogenically cooled ice particles inside the high-speed water jet. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 289.
7. Miturska-Barańska I., Rudawska A., Doluk E. The influence of sandblasting process parameters of aerospace aluminium alloy sheets on adhesive joints strength. *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14, No. 21.
8. Nikolaenko V.H. *Vibrational technologies of finishing treatment of parts*. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2020.
9. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. *Tribology of Abrasive Machining Processes*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 600 p.
10. Thomson W.T., Dahleh M.D. *Theory of Vibration with Applications*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. 524 p.
11. Den Hartog J.P. *Mechanical Vibrations*. New York: Dover Publications, 1985. 436 p.

12. Harris C.M., Piersol A.G. Harris' Shock and Vibration Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
13. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications. Singapore: World Scientific, 2000. 509 p.
14. Babichev A.P. Dynamics of vibrational processing systems with free abrasive media. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019.
15. Hladkyi M.I. Mechanical waves and oscillatory processes in elastic media. Kyiv: Naukova Dumka, 2018.
16. Kaplunov S.V. Mechanics of materials and wave processes. Kharkiv: KhNU, 2019.
17. Radchenko V.A. Ultrasonic oscillations and wave processes in material processing. Dnipro: DNU, 2020.
18. Petrov I.H. Dynamics of elastic. Kyiv: KNU, 2015.
19. Popov O.M. Shock waves and their propagation in metal rods. Lviv: LNU, 2018.
20. Sidorenko A.I. Intensive material processing using mechanical vibrations. Kharkiv: Mashynobuduvannya, 2021.
21. Chernenko O.O. Wave processes in impact and non-stationary systems. Kyiv: Naukova Dumka, 2017.
22. Nikolaenko A.P. Increasing the productivity of vibrational processing by selecting the location of the vibration source relative to a U-shaped container: Dissertation... candidate of technical science: 05.03.01 Donetsk: Donetsk National Technical University, 2010. 243 p.
23. Bhushan B. Introduction to Tribology. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013. 711 p.
24. Kalpakjian S., Schmid S.R. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 6th ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014. 1018 p.
25. Evans A.G., Hutchinson J.W., Fleck N.A. Mechanics of Materials: Deformation and Contact Interactions in Particulate Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
26. Rittel D., Chen W. High strain rate deformation and impact behavior of granular and composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2005. Vol. 53, No. 12. P. 2711–2731.
27. Nguyen T., Papadopoulos C. Vibratory finishing and micro-cutting: Analysis of particle-surface interactions in abrasive media. *Wear*. 2010. Vol. 269, No. 11–12. P. 845–854.
29. Zhao Y., Guo X. Dynamic behavior of particulate media under vibration: Implications for surface treatment. *Powder Technology*. 2017. Vol. 319. P. 1–12.
30. Goldsmith W. Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd., 1960. 379 p.
31. Stronge W.J. Impact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 380 p.
32. Johnson K.L. Contact Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 452 p.

Романченко О.В. Фінішна обробка деталей комбінованим робочим середовищем під дією коливань. Фізичні явища та динаміка контактної взаємодії.

В статті проаналізовані процеси фінішної обробки з використанням комбінованого абразивного середовища під дією коливань, що поєднує механічні, фізичні, хімічні та енергетичні явища. В роботі досліджується фізична природа коливальних процесів, закономірності взаємодії між абразивними частками та поверхнею деталі, а також визначаються умови, за яких досягається максимальна ефективність обробки. Представлено порівняльний аналіз традиційних методів фінішної обробки – шліфування, галтування, абразивно-струменева та вібраційна обробка. Визначено їх переваги, недоліки та межі застосування в сучасному машинобудуванні.

Запропоновано новий метод фінішної обробки – обробка комбінованим робочим середовищем, який поєднує абразивні, хімічні, термічні, електричні та механічні дії. Комбіноване робоче середовище складається з абразивних гранул, технологічних розчинів та інтенсифікаторів процесу, які під дією коливань здійснюють складний, детермінований циркуляційний рух, створюючи чисельні мікроудари на поверхні деталі. Це дозволяє проводити операції очищення, шліфування, полірування, зміцнення поверхневого шару, зняття залишкових напружень, покращення адгезії та підготовку поверхні до нанесення покриття. Як і традиційні методи, цей метод дозволяє одночасно обробляти велику кількість деталей, а його комплексний підхід дозволяє досягти необхідної якості поверхні за короткий час обробки.

Розкрито механізм контактної взаємодії між абразивним середовищем та поверхнею деталі. Встановлено, що процес супроводжується явищами удару, кавітації, адгезії, зношуванням, поширенням хвиль та розсіюванням енергії. Коливання поділяються на частотні діапазони, від інфразвукових до ультразвукових. Досліджено вплив вільних, вимушених, параметричних та автоколивань на процес, а також їх вплив на поведінку робочого середовища та деталей.

Показано, що процес обробки є складною колиально – ударною системою з розподіленими параметрами, в якій значну роль відіграють частота, амплітуда, властивості абразиву, геометрія деталі та режими роботи обладнання.

Досліджено динамічні властивості робочого середовища: циркуляційний рух, пружна ударна взаємодія частинок, формування хвиль тиску, контактні процеси та деформація поверхневих шарів. Надано інформацію щодо впливу технологічних розчинів на інтенсивність процесу. Представлено математичні залежності, що описують зміни параметрів контакту, енергії удару, швидкості часток, сили взаємодії.

Запропонований підхід розширює можливості фінішної обробки в машинобудуванні, зокрема для деталей зі складною геометрією та високими вимогами до якості поверхні, та створює основу для подальшого розвитку технологій обробки комбінованими робочим середовищами під дією коливань.

Ключові слова: *фінішна обробка, комбіноване робоче середовище, коливальні процеси, мікроударі, циркуляційний рух, технологічний процес.*

Романченко О.В. – к.т.н., доц., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, alexvromanchenko@snu.edu.ua

Стаття подана 13.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-59-62>

УДК 621.9.048

THE INFLUENCE OF RESERVOIR LINING MATERIAL ON THE PERFORMANCE OF PROCESSING OF PARTS WITH A COMBINED WORKING MEDIA UNDER THE INFLUENCE OF OSCILLATIONS

Romanchenko O.V. Ivchenko A.G.

ВПЛИВ МАТЕРІАЛУ ФУТЕРУВАННЯ РЕЗЕРВУАРУ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ КОМБІНОВАНИМ РОБОЧИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ПІД ДІЄЮ КОЛИВАНЬ

Романченко О.В., Івченко А.Г.

This work examines the effect of the lining material of a reservoir used for processing combined free working media under the action of oscillations on the overall productivity of the surface finishing process. The method is based on the transmission of pulses from the oscillating walls of the reservoir to the working media, which creates a stable circulating flow of the abrasive media, chemical solutions, and workpieces. The relative movement of the media elements determines the metal removal rate, and the presence of passive zones within the reservoir significantly affects the uniformity of the finish processing. While the parameters of the oscillation process have been thoroughly studied in the scientific literature, the influence of the abrasive properties of the reservoir walls remains understudied, despite the widespread use of rubber coatings in industrial equipment.

This paper presents the results of an experimental study conducted on equipment with a 25-liter reservoir. Two lining configurations were investigated: a traditional lining with a rubber surface and a surface lined with silicon carbide plates. Porcelain balls and a sodium bicarbonate solution were used as the working medium. Before the main machining operation, a cleaning step was performed using a continuous water supply. After the main operation, a repeat cleaning step was performed. After machining, the mass of metal removed from the samples was assessed in a series of ten parallel tests for each lining configuration.

The data obtained showed that changing the reservoir wall roughness did not significantly affect the circulation of the working media. The use of an abrasive silicon carbide lining significantly increased process productivity – the average metal removal rate increased by 40%. The possibility of intensifying oscillating machining by using wall materials with abrasive

properties without compromising the stability of the working media was experimentally confirmed. The study demonstrates the potential of using abrasive coatings to improve the machining efficiency in equipment designed for finishing with abrasive tools without a rigid kinematic connection.

Key words: combined working media, reservoir lining, abrasive coatings; circulation motion, metal removal.

Introduction. As is well known, the process of machining with a combined working media under oscillation involves the sequential application of multiple micro-impacts by working media granules to the surface of the workpiece. The key conditions necessary for the machining process are contact between the workpiece and the working media granules and the transfer of a force impulse from the reservoir walls to the contact zone. As a result of the transfer of impulses from the oscillation source, the reservoir oscillates, which are transmitted to the working media. As a result, a stable circulatory movement of the working media and the workpiece occurs within the reservoir. The relative movement of the workpiece and granules, therefore, determines the machining intensity. Circulatory movement occurs under certain conditions due to the effect of oscillational transport.

A large number of studies have been devoted to these issues. Theoretical models have been proposed and experimental studies have been conducted to evaluate the influence of various process parameters [1, 2].

At the same time, there are currently virtually no studies devoted to assessing the impact of reservoir wall surface characteristics on the efficiency of process operations. However, indicators characterizing the material used are used in many theoretical studies [1, 3].

This is due to the fact that in the most common and widely used equipment in production, the reservoir walls are coated with a layer of rubber, 5 to 100 mm thick, resistant to the acidic and alkaline solutions used during processing. Studies of the geometric parameters of the reservoir wall surfaces are known, but the properties of the coating have not been considered [4].

Theoretical studies of the influence of the characteristics of the wall surface material, including the use of surface materials with abrasive properties as an additional tool, are difficult because, to date, there is no mathematical model capable of adequately describing the characteristics of the movement of the part and tool in the reservoir.

Due to the complexity and multifactorial nature of the processes being studied, significant differences in the results obtained are evident in both theoretical and experimental data. This is due to the more practical nature of the experiments.

In most studies, circulation of the working media is considered a process that ensures the movement of the part through zones with varying machining performance, thereby achieving uniform machining across the entire surface of the part. The walls of the reservoir act as a means of influencing the tool or as an additional means of limiting the movement of the part (in cases where the part is fixed using additional fixtures) [5].

However, unlike classical vibration machining, machining with a combined working media under oscillation is a more complex method. Its integrated approach allows for consideration of the shape and abrasive characteristics of the tool walls and/or additional deflectors, which influence the direction of the working media and workpiece flows. It should be noted that stable movement of the entire load during machining with a combined working media under oscillation is essential for ensuring high productivity and process determinacy. With this method, the working media movement is essentially circulatory, with additional flows that can be achieved through the use of deflectors, additional oscillation sources, or the reservoir wall parameters.

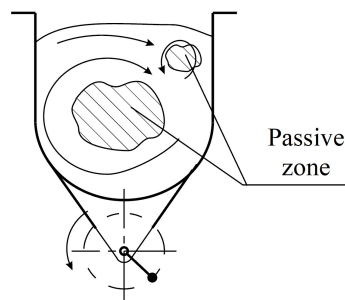


Fig. 1. Passive zones arising during processing with a combined working environment under the influence of oscillations

Ensuring uniform processing of parts throughout the entire volume of the reservoir is a complex task due to the presence of passive zones, in which the processing intensity is reduced [4]. The location of such passive zones in the center of the reservoir and its upper section is shown in Figure 1. This arrangement of these zones occurs due to a reduction in the transmitted impulse from the oscillation source to the working media, which is especially characteristic of the zone in the upper section, as well as due to a decrease in the speed of granule movement, which has a greater impact on granules in the center of the reservoir. Obviously, the angular velocity of the granules will decrease as they approach the center of the reservoir.

The dynamic trajectories of the workpiece(s), individual granules, and all granules have not yet been fully explored. Most researchers agree that the movement of the working media elements follows a spiral curve (Fig. 2, a). The workpieces also follow a spiral curve and, upon reaching the reservoir wall, move along it toward the free loading surface. They then slide toward the opposite wall and are again immersed in the working media, continuing their movement [5]. There are also studies in which the movement of granules during processing follows a trajectory resembling centroids (Fig. 2, b) [6]. As a result, under the action of inertial forces, the workpieces and granules are pressed against each other, making relative loop-like movements, gradually approaching the center of the reservoir and thus the workpieces are drawn into the passive zone.

It is necessary to take into account that the characteristics of the equipment, its operating mode and the parameters of the tool play an important role, which, as already mentioned above, are different in most studies.

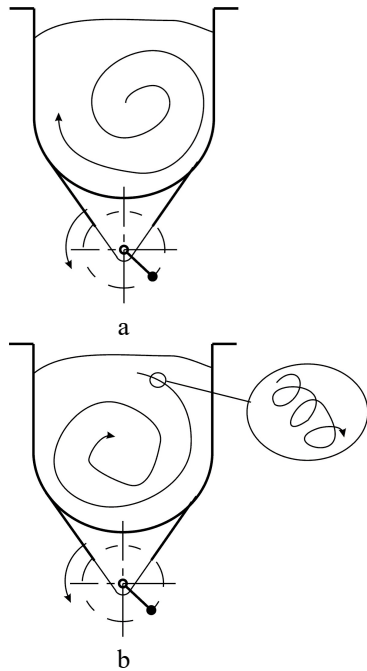


Fig. 2. Trajectories of movement of the loading mass in the volume of the reservoir: a – movement along a trajectory in the form of a spiral; b – movement along a trajectory in the form of a centroid

The objective. Determining the influence of the use of abrasive material for lining the walls of a reservoir of equipment for processing a combined working medium under the influence of oscillations on the movement of the working media and metal removal.

Research results. There is insufficient research into the degree of influence of the surface characteristics of the reservoir walls, namely its abrasive properties and geometric parameters, on the processing process.

In response to the above questions, experimental studies were conducted to assess the influence of reservoir wall surface characteristics on the amount of metal removed from the workpiece surface and the movement of the working media. This study assessed the influence of the abrasive properties of the reservoir surface, using identical geometric parameters.

The studies were conducted on a UVI-25 laboratory setup in a 25-liter reservoir. The HFAA (heat-frost-acid-alkali resistant) rubber was used as the original material for the reservoir walls, and silicon carbide plates were used as the new material. The amplitude and frequency of oscillations during the study were 4 mm and 75 Hz, respectively. The combined working environment included porcelain balls with a diameter of 10 mm as an abrasive tool and a 5% solution of sodium bicarbonate (NaHCO₃) as a chemical component. At the beginning of the treatment, primary rinsing was carried out by continuously feeding and draining water for 5 minutes, then the main solution was fed. At the end of the treatment, the rinsing operation was repeated. Cylindrical samples with a diameter of 14 mm and a length of 30 mm were used as parts. The material of the studied samples is

copper-zinc alloy LS 59-1L (0,97% Pb, 58,52% Cu, other - Zn), an analogue according to the ISO system - CuZn39Pb1. Ten samples were processed simultaneously; after processing, the process efficiency was assessed based on the mass of metal removed.

The study included two series of 10 tests each, ensuring that the metal removal rate dispersion field was estimated within a 90% confidence interval using the Student's t-test. The experimental results are presented in Table.

Table

Results of experimental studies of the influence of the surface material of the reservoir walls on the efficiency of the processing

Sample number	Average metal removal rate in a reservoir with a traditional lining	Average metal removal rate in a silicon carbide lined reservoir
1.	0,0621	0,1114
2.	0,0625	0,1074
3.	0,0634	0,1138
4.	0,0618	0,1157
5.	0,0619	0,1064
6.	0,0782	0,1176
7.	0,0628	0,1135
8.	0,0613	0,1144
9.	0,0646	0,1153
10.	0,0811	0,1179

The speed of the working media's surface layer was determined by the speed of a specially designed "turntable" device. This device consists of a hub with four blades mounted crosswise. The hub's axle is mounted in bearings to ensure free rotation and is secured to a fixed platform so that the working media exerts a constant force on the blades.

During the studies in both series, the flow pattern of the working media was stable and deterministic, and the circulation speed was 10 rpm. Consequently, changes in the surface roughness of the reservoir walls do not significantly affect the flow pattern of the working media.

However, the results of evaluating the process performance based on metal removal rate, as one of the key performance indicators, presented in Table 1, were predictably high when using reservoir walls with an abrasive component. The use of an abrasive coating allowed for an average increase in metal removal rate of 40%.

Thus, the possibility of intensifying the process of treatment with a combined working media under the action of oscillations by using an abrasive coating on the walls of the reservoir, as well as the absence of a significant influence of the roughness of the surface of the lining on the nature of the

movement of the working media, was experimentally demonstrated.

Conclusions. Based on the experimental studies conducted, it was established that the abrasive properties of the reservoir surface do not have a significant impact on the circulation of the working media; the nature of the movement remains stable and deterministic.

The lining material of the reservoir directly affects the amount of metal removed, which in turn affects the overall performance of the process of processing a combined working media under the influence of oscillations.

The use of silicon carbide as a lining increases the efficiency of the process by 40%, which is explained by the additional abrasive effect of the walls on the surface of the part, which in this case act as an abrasive tool.

References

1. Malkin S., Guo C. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives. 2nd ed. New York: Industrial Press Inc., 2008. 372 p.
2. Blekhman I.I. Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications. Singapore: World Scientific, 2000. 509 p.
3. Babichev A.P. Dynamics of vibrational processing systems with free abrasive media. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019.
4. Mitsyk, V.Ya. Intensification of processing of parts in vibrating reservoirs with counter-moving flows of the working media Dissertation ... candidate of technical science: Voroshilovgrad, 1986. 246 p.
5. Pshenichnyy, I.N. Expanding of the technological capabilities of processing of parts in vibrating reservoirs Dissertation ... candidate of technical science: Lugansk. 2005. 265 p.
6. Branspiz, E.V. (2001). Increasing the efficiency of vibro-abrasive machining by rationally selecting its main parameters. Dissertation ... candidate of technical science: Lugansk. 2005. 265 p.

Романченко О.В. Івченко А.Г. Вплив матеріалу футерування резервуару на продуктивність процесу обробки деталей комбінованим робочим середовищем під дією коливань.

В роботі досліджується вплив матеріалу футерування резервуару обладнання для обробки комбінованим вільним робочим середовищем під дією коливань на загальну продуктивність процесу фінішної обробки поверхні деталей. Принцип методу заснований на передачі імпульсів від стінок резервуара, що коливаються, робочому середовищу,

що формує стійкий циркуляційний рух абразивного середовища, хімічних розчинів і оброблюваних деталей. Відносний рух елементів середовища визначає інтенсивність знімання металу, а наявність пасивних зон усередині резервуара істотно впливає на рівномірність обробки. У науковій літературі докладно досліджено параметри вібраційного процесу, проте вплив абразивних властивостей стінок резервуару вивчено недостатньо, незважаючи на широке застосування гумових покриттів у промисловому устаткуванні

У роботі представлені результати експериментального дослідження, проведеного устаткуванні з резервуаром об'ємом 25 літрів. Досліджувалися дві конфігурації футеровки: традиційна з облицюванням поверхні резервуара гумою та поверхня фанерована пластинами карбіду кремнію. Як робоче середовище використовувалися фарфорові кулі та розчин гідрокарбонату натрію. Перед основною операцією обробки проводилася операція очищення із застосування безперервної подачі води. Після завершення основної операції проводилася повторна операція очищення. Після обробки оцінювалася маса знятого металу із зразків при серіях з десяти паралельних дослідів кожної конфігурації футеровки.

Отримані дані показали, що зміна шорсткості стінок резервуара не помітно впливає на циркуляційний рух робочого середовища. Застосування абразивного футерування з карбіду кремнію забезпечило значне збільшення продуктивності процесу – середній знімання металу зріс на 40%. Експериментально підтверджено можливість інтенсифікації вібраційної обробки за рахунок використання матеріалів стінок з абразивними властивостями, без порушення стабільності руху робочого середовища. Дослідження показує перспективність застосування абразивних покриттів підвищення ефективності обробки деталей в устаткуванні, призначеному для фінішної обробки абразивним інструментом без жорсткого кінематичного зв'язку.

Ключові слова: комбіноване робоче середовище, футерування резервуара, абразивні покриття; циркуляційний рух, знімання металу.

Романченко О.В. – к.т.н., доц., завідувач кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, alexvromanchenko@snu.edu.ua

Івченко А.Г. – Phd., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, ivchenko_ag@snu.edu.ua

Стаття подана 15.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-63-68>

УДК 631.3

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ДРОНІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

Мелконов Г.Л., Єпіфанова О.В.

PROSPECTS FOR THE USE OF DRONES IN AGRICULTURE

Melkonov H.L., Yepifanova O.V.

У сучасному сільському господарстві відбувається справжня трансформація через впровадження новітніх технологій. Однією з таких інновацій є використання дронів, що значно спрощують процеси управління фермерськими господарствами та підвищують ефективність агробізнесу.

Дрони, або безпілотні літальні апарати (БПЛА), стали незамінними помічниками у сфері аграрного бізнесу. Завдяки їх використанню, фермери можуть оперативно отримувати важливу інформацію про стан своїх полів. Це дозволяє швидко реагувати на зміни та приймати обґрунтовані рішення.

Застосування дронів у сільському господарстві дедалі поширюється. Відбувається це пропорційно до збільшення кількості безпілотників та розширення їхніх функцій. Дрони виконують моніторинг, роблять аерофотознімки, створюють 3D-карти, здійснюють посів насіння, вносять добрива та хімікати, контролюють посіви та сільськогосподарських тварин, допомагають в іригації.

Використання дронів майже в кожному секторі економіки швидко зростає, але використання дронів у сільськогосподарській галузі зростає високими темпами. За деякими даними, очікується, що ринок сільськогосподарських дронів зросте з 1,2 мільярда доларів у 2019 році до 4,8 мільярдів доларів у 2025 році. За кілька років використання дронів стане більш поширеним у великих і малих фермах, починаючи від розвідки та закінчуючи охороною. Інформація, зібрана безпілотниками на фермах, часто використовується для кращого прийняття агрономічних рішень і є частиною системи, яку зазвичай називають «точним землеробством».

У багатьох місцях використання дронів уже стало невід'ємною частиною великомасштабних операцій точного землеробства. Дані, зібрані за допомогою дронів, які записують поля, допомагають фермерам планувати посіви та обробку для досягнення

найкращих врожайів. Деякі звіти вказують на те, що використання систем точного землеробства може підвищити врожайність на цілих 5%, що є значним збільшенням у галузі із зазвичай невеликою нормою прибутку.

Використання дронів у сільському господарстві не лише підвищує ефективність і продуктивність, а й робить виробництво більш стійким та екологічним. Інвестиції в такі технології поступово стають стандартом сучасного агробізнесу, особливо для тих господарств, які прагнуть оптимізувати ресурси та знизити витрати.

Keywords: сільське господарство, дрони, точне землеробство, добрива.

Вступ. Сучасне сільське господарство, в тому числі землеробство стикається з низкою проблем, які впливають на продуктивність, екологічну стійкість та економічну ефективність. Інтенсивне землеробство, ерозія, виснаження поживних речовин і засолення призводять до втрати родючості земель. Монокультурне вирощування та використання пестицидів зменшують різноманітність рослин і тварин, що негативно впливає на екосистеми. Надмірне використання води для зрошення, забруднення джерел пестицидами та добривами, а також скорочення запасів прісної води створюють серйозні виклики. Невеликі фермери часто стикаються з високими витратами на насіння, добрива та техніку, а також із нестабільними цінами на продукцію. Надмірна залежність від пестицидів і синтетичних добрив призводить до забруднення довкілля, погіршення здоров'я людей. Для вирішення цих викликів у розвинених країнах активно

впроваджуються точне землеробство, дрони та IT-рішення. У зв'язку з цим науковий інтерес становить вплив використання дронів на сільське господарство в цілому та землеробство зокрема.

Мета роботи. Висвітлити сутність застосування в сільському господарстві дронів та їхнього впливу на підвищення ефективності та сталості агробізнесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження в розробці та впровадженні дронів ведуться вже більше десяти років, та з кожним роком впровадження їх в агарний сектор значно зростає. З 2016 року дослідники та викладачі американського Університету Land-Grant у 20 штатах працювали над тим, щоб збільшити використання безпілотних літальних апаратів для дистанційного зондування та точного управління сільським господарством і природними ресурсами в рамках проекту для кількох штатів. Завдяки різноманітному досвіду та членам з багатьох штатів ця команда могла випробовувати дрони в різноманітних ситуаціях реального сільського господарства. Навпаки, більшість попередніх досліджень були зосереджені на використанні безпілотників на одному полі, певній культурі чи стресовому факторі. Координація ж розподіляє робоче навантаження, зменшує дублювання та знижує деякі витрати. Обмін інформацією, обладнанням та іншими ресурсами допомагає подолати обмежені можливості однієї установи. У рамках цього проекту вчені оцінили та визначили найбільш надійні, економічно ефективні та зручні платформи безпілотників і датчики для моніторингу та управління стресовими факторами в сільському господарстві та природних ресурсах. Щоб підвищити точність зібраних даних, учасники проекту розробили апаратне забезпечення, програмне забезпечення та докладні протоколи для калібрування та використання дронів, а також нові інструменти, які допомагають користувачам дронів керувати даними, які вони збирають, включаючи цифровий журнал.

У країнах на південь від Сахари Африканський Союз підтримав поширення комерційних дронів для сільського господарства через проект «Очі в небі, розумні технології на землі», який очолює Технічний центр сільськогосподарської та сільської співпраці (СТА). Але у своєму звіті про дрони той самий орган зазначає, що хоча дослідження дронів зосереджені в основному на типі інформаційних

технологій, вони не розглядають достатньо того, що робить дрони економічно ефективними для африканських дрібних землевласників — у яких мало землі, проблеми з землеволодінням і безліч систем землеробства. За даними Африканського Союзу на всьому континенті існує відсутність законодавчої ясності, близько 26 відсотків африканських країн мають закони, спрямовані проти БПЛА, суворі обмеження або тимчасові заборони БПЛА. Це уповільнює розвиток галузі.

Міжнародний дослідницький інститут рису (IRRI) і Філіппінський науково-дослідний інститут рису (DA-PhilRice) запустили проект Drones4Rice під час початкового семінару, який проходив у штаб-квартирі IRRI в Лос-Анджелесі. Ваїос, Laguna 16-17 квітня 2024 року. Проект Drones4Rice створить стандартизовані протоколи для внесення дроном насіння, добрив і пестицидів для виробництва рису на Філіппінах. Впровадження оптимізованих протоколів і спрощених правил дозволить приватному сектору масштабувати доступні послуги безпілотників для фермерів. Ініціатива має значний потенціал для підвищення продуктивності, доходу та стійкості фермерів шляхом пропаганди точного землеробства та методів сталого вирощування рису.

Результати дослідження. Сільськогосподарські дрони мають багато переваг. Вони значно впливають на врожайність сільськогосподарських культур, насамперед завдяки своїй здатності зменшувати втрати при вирощуванні та збільшувати норму обприскування. Сільськогосподарські дрони можуть точно відстежувати моделі росту культур і швидко виявляти будь-які потенційні проблеми, такі як спалахи хвороб або нашествия шкідників. Цей рівень точності забезпечує швидке втручання, таким чином зменшуючи втрати, які в іншому випадку знизили б загальний урожай.

Крім того, дрони довели свою економічну ефективність у порівнянні з традиційними методами землеробства, такими як використання причіпних або самохідних обприскувачів.

Зниження витрат на виробництво значною мірою пов'язано зі здатністю дронів працювати без участі людини після того, як запрограмована траєкторія польоту. Крім того, вони спричиняють менше ущільнення ґрунту, ніж колісні транспортні засоби, тим самим

зменшуючи втрати від витоптування культур під час процедур обприскування.

Незважаючи на друге місце за початковими витратами на виробництво в порівнянні з іншими технологічними варіантами, економічний ефект від використання сільськогосподарських дронів переважає цей фактор через значний внесок у підвищення врожайності та зменшення втрат від витоптування. Таким чином стає очевидною їх значна перевага в порівнянні зі звичайними сільськогосподарськими методами.

Щоб зрозуміти переваги сільськогосподарських дронів, проведено порівняння з іншими технологіями. Порівняльний аналіз між традиційними методами та передовими технологічними методами в сучасному сільському господарстві відкриває вартість уваги уявлення про їхній відповідний економічний вплив.

Використання дронів у сільському господарстві, наприклад, було визначено як значний внесок у підвищення ефективності та продуктивності. Незважаючи на те, що вони займають друге місце за виробничою собівартістю серед інших варіантів, сільськогосподарські дрони дають найбільший економічний ефект за рахунок зниження норм обприскування та втрат від витоптування.

В роботі визначені переваги дронів у сільському господарстві:

1. Використання безпілотників зменшує кількість проїздів колісної техніки через поля протягом вегетаційного періоду, що зменшує ущільнення ґрунту та зменшує шкоду навколишньому середовищу.

2. Безпілотники можуть виконувати різноманітні завдання: від моніторингу посівів до обприскування з мінімальним втручанням людини, зменшуючи потребу в робочій силі.

3. Дрони здатні доставляти точну кількість добрив або пестицидів, де це необхідно, тим самим оптимізуючи використання ресурсів і запобігаючи втратам. Завдяки точковому розпиленню (наприклад, пестицидів чи добрив) дрони зменшують надмірне використання хімікатів на 20-40% порівняно з традиційними методами, як-от трактори чи авіація.

4. Безпілотники можна легко інтегрувати в існуючі сільськогосподарські операції, не порушуючи поточні практики, одночасно підвищуючи загальну продуктивність.

5. Дрони виконують моніторинг в реальному часі, тобто дають змогу швидко обстежувати великі площі, відстежувати стан

посівів, ріст рослин і навіть прогнозувати врожайність, що особливо корисно в умовах мінливого клімату.

6. За допомогою дронів здійснюється точне землеробство. Дрони оснащені камерами, сенсорами (тепловими, мультиспектральними) і GPS, що дозволяє створювати детальні карти полів. Фермери можуть виявляти проблемні зони: де бракує вологи, поживних речовин чи є шкідники. Це допомагає оптимізувати внесення добрив, води та пестицидів, зменшуючи витрати й екологічне навантаження.

Але незважаючи на свої переваги, інтеграція технології безпілотників у сільське господарство стикається з проблемами регулювання, які необхідно вирішити для широкого впровадження. Хоча ціни на дрони знижуються, початкові інвестиції (дрон, програмне забезпечення, навчання) можуть бути непосильними для дрібних фермерів, особливо в країнах, що розвиваються. Обмежений час польоту (зазвичай 20-60 хвилин) і вантажопідйомність ускладнюють обробку великих площ за один раз. Погана погода (вітер, дощ) може перешкоджати роботі. У багатьох країнах використання дронів регулюється законами про авіацію, що вимагає ліцензій чи дозволів, особливо для комерційного використання. Фермерам потрібні навички для управління дронами та аналізу отриманих даних, що може бути проблемою для тих, хто не знайомий із технологіями. Проте високий економічний результат використання дронів підкреслює їх важливу роль у сучасній сільськогосподарській практиці.

Також в роботі проведено аналіз економічної ефективності сільськогосподарських дронів. Незважаючи на скептицизм щодо початкової вартості, сільськогосподарські БПЛА представляють економічний парадокс; вони вимагають вищих витрат на виробництво, але забезпечують чудову фінансову віддачу завдяки мінімізованим експлуатаційним витратам і підвищеній врожайності.

Вплив на врожайність є значним, оскільки дрони дозволяють точно, цілеспрямовано вносити добрива та пестициди, зменшуючи втрати під час вирощування та обмежуючи кількість проїздів колісних транспортних засобів через поля протягом вегетаційного періоду. Це не тільки зменшує витоптування, але й зменшує споживання палива, сприяючи значному зниженню виробничих витрат.

Хоча ці переваги вражаючи, важливо визнати потенційні обмеження та проблеми, пов'язані з технологією дронів у сільському господарстві. Вони можуть включати нормативні перешкоди, технічні складності, проблеми конфіденційності або просто потребу в прийнятті фермерами цієї нової технології.

Незважаючи на ці фактори, багато фермерів визнають довгострокові переваги для навколишнього середовища, такі як зменшення споживання води та менший стік хімічних речовин у прилеглі водойми, що сприяє сталим методам ведення сільського господарства.

Загалом, хоча спочатку сільськогосподарські дрони можуть вимагати більших капіталовкладень, їх використання, як правило, призводить до більшої економічної ефективності з часом після того, як фермери повністю засвоять технологію їх використання.

Проведений аналіз дозволив означити майбутні перспективи використання сільськогосподарських дронів. Дивлячись у майбутнє, очікується, що сільськогосподарські дрони продовжуватимуть революціонізувати практику ведення сільського господарства, забезпечуючи точне землеробство та значний внесок у сталість.

Потенційні проблеми, пов'язані з використанням безпілотних літальних апаратів у сільському господарстві, включають правові та нормативні питання, проблеми конфіденційності та технологічні обмеження. Однак очікується, що прогрес у технології з часом подолає ці проблеми.

Вплив сільськогосподарських дронів на навколишнє середовище є ще одним критичним питанням, яке потребує подальшого дослідження. Хоча використання безпілотних літальних апаратів може зменшити викиди від традиційної сільськогосподарської техніки, все ж можуть бути екологічні наслідки через їх конструкцію та утилізацію.

Очікується, що ринковий попит на сільськогосподарські безпілотники зросте в найближчі роки завдяки зростаючій обізнаності серед фермерів про їхні переваги та підтримці урядів у всьому світі.

Тим не менш, для забезпечення безпечної діяльності та пом'якшення будь-яких негативних впливів на суспільство чи навколишнє середовище необхідно запровадити надійну нормативну базу.

Оскільки технологія розвивається з безпрецедентною швидкістю, стає необхідним,

щоб нормативні акти та галузеві стандарти не відставали від цих змін.

Висновки. Безпілотники мають великий потенціал для зміни сільського господарства як України так і всього світу. З розвитком технологій у майбутньому, очікується, що виробництво дронів стане економічним. Значення дронів може заохотити молодь до роботи в сучасному аграрному секторі. Наступна сільськогосподарська революція буде орієнтована на дані безпілотників. Належне використання даних може підвищити продуктивність сільського господарства без будь-яких негативних наслідків для навколишнього середовища та разом із покращенням засобів існування фермерів. Тому дрони можуть стати частиною сільського господарства в майбутньому, допомагаючи фермерам краще керувати своїми сферами діяльності та ресурсами у стійкий спосіб.

У первинній виробничій галузі високотехнологічні дрони дозволяють операторам автоматизувати деякі процеси, такі як посадка, керування худобою або обприскування посівів. Ці потенційні застосування дронів відкривають нову галузь сільськогосподарських процесів, яка іноді називається точним землеробством.

Без сумніву, дрони стають невід'ємною частиною агробізнесу. Вони відкривають нові можливості для фермерів, роблячи процеси більш прозорими та керованими. Інновації у цій сфері продовжують розвиватися, і можна очікувати, що в майбутньому дрони стануть ще більш досконалими та доступними.

Використання дронів у землеробстві та сільському господарстві суттєво змінює підходи до управління полями, підвищуючи ефективність, точність і сталість.

Таким чином, впровадження дронів у сільське господарство є важливою складовою сучасних інновацій, що сприяє підвищенню ефективності та сталості агробізнесу.

Л і т е р а т у р а

1. Application of Drone in Agriculture / S. Ahirwar, R. Swarnkar, S. Bhukya, G. Namwade. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2019. Vol. 8(01). P. 2500-2505. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.264> (accessed 19.11.2025).
2. Sylvester G. *E-agriculture in action: Drones for agriculture*. Bangkok: Published by Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Telecommunication Union, 2018. 112

- p. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i8494en> (accessed 19.11.2025).
3. Miller J. O., Adkins J. Types of drones for field crop production. University of Delaware : Fact sheets and publications. Updated March 2025. URL: <https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/cooperative-extension/fact-sheets/typesof-drones-for-field-crop-production> (accessed 19.11.2025).
 4. Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators : Communications Review / B. Silver, M. Mazur, A. Wiśniewski, A. Babicz. PwC. 2017. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf> (accessed 19.11.2025).
 5. Agriculture Drones Market with COVID-19 Impact Analysis, by Application (Precision Farming, Livestock Monitoring), Offering, Farming Environment, Farm Produce, Component, and Geography – Global Forecast to 2025. Markets and Markets Research. 2020. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/agriculture-drones-market-23709764.html> (accessed 19.11.2025).
 6. Економічна ефективність використання дронів у сільському господарстві / І. О. Пономаренко, В. А. Тарасов, А. С. Ігнатченко, Ю. В. Химченко, Б. Л. Ковальов. Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка. 2021. № 4. С. 235–240. DOI: 10.21272/1817-9215.2021.4-27 (дата звернення 19.11.2025).
 7. Аніскевич Л. В., Адамчук В. І. Технології точного землеробства. Науковий вісник Національного аграрного університету. 2006. Вип. 101. С. 8-27.
 8. Діордієв В. Т., Кашкар'ов А. О., Семендяєв О. Є. Проблеми використання дронів у задачах обприскування сільськогосподарських культур та шляхи їх вирішення. Науковий вісник ТДАТУ. 2019. Вип. 9. Т. 1. С. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.32848/10.31388/2220-8674-2019-1-45> (дата звернення 19.11.2025).
 - perative-extension/fact-sheets/typesof-drones-for-field-crop-production (accessed 19.11.2025).
 4. Welcome to the era of drone-powered solutions: a valuable source of new revenue streams for telecoms operators : Communications Review / B. Silver, M. Mazur, A. Wiśniewski, A. Babicz. PwC. 2017. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/communications/pdf/communications-review-july-2017.pdf> (accessed 19.11.2025).
 5. Agriculture Drones Market with COVID-19 Impact Analysis, by Application (Precision Farming, Livestock Monitoring), Offering, Farming Environment, Farm Produce, Component, and Geography – Global Forecast to 2025. Markets and Markets Research. 2020. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/MarketReports/agriculture-drones-market-23709764.html> (accessed 19.11.2025).
 6. Економична ефективність використання дронів у сільському господарстві / І. О. Пономаренко, В. А. Тарасов, А. С. Ігнатченко, Ю. В. Химченко, Б. Л. Ковальов, Visnyk Sums'koho derzhavnoho universytetu. Seriya Ekonomika. 2021. № 4. P. 235–240. DOI: 10.21272/1817-9215.2021.4-27 (accessed 19.11.2025).
 7. Aniskevych L. V., Adamchuk V. I. Tekhnolohiyi tochnoho zemlerobstva. Naukovyy visnyk Natsional'noho ahrarnoho universytetu. 2006. Iss. 101. P. 8-27.
 8. Diordiyev V. T., Kashkar'ov A. O., Semendyayev O. Ye. Problemy vykorystannya droniv u zadachakh obpryskuvannya sil'skohospodars'kykh kul'tur ta shlyakhy yikh vyrishennya. Naukovyy visnyk TDATU. 2019. Iss. 9. Vol. 1. P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.32848/10.31388/2220-8674-2019-1-45> (accessed 19.11.2025).

References

1. Application of Drone in Agriculture / S. Ahirwar, R. Swarnkar, S. Bhukya, G. Namwade. Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2019. Vol. 8(01). P. 2500-2505. doi: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.264> (accessed 19.11.2025).
2. Sylvester G. E-agriculture in action: Drones for agriculture. Bangkok: Published by Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Telecommunication Union, 2018. 112 p. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i8494en> (accessed 19.11.2025).
3. Miller J. O., Adkins J. Types of drones for field crop production. University of Delaware : Fact sheets and publications. Updated March 2025. URL: <https://www.udel.edu/academics/colleges/canr/coo>

Melkonov H.L., Yepifanova O.V. Prospects for the use of drones in agriculture

Modern agriculture is undergoing a real transformation through the introduction of new technologies. One such innovation is the use of drones, which significantly simplify farm management processes and increase the efficiency of agribusiness.

Drones, or unmanned aerial vehicles (UAVs), have become indispensable assistants in the field of agribusiness. Thanks to their use, farmers can quickly receive important information about the condition of their fields. This allows them to quickly respond to changes and make informed decisions.

The use of drones in agriculture is becoming increasingly widespread. This is happening in proportion to the increase in the number of drones and the expansion of their functions. Drones perform monitoring, take aerial photographs, create 3D maps, sow seeds, apply fertilizers and chemicals, monitor crops and farm animals, and assist in irrigation.

The use of drones in almost every sector of the economy is growing rapidly, but the use of drones in the agricultural industry is growing at a high rate. The agricultural drone market is expected to grow from \$1.2 billion in 2019 to \$4.8 billion by 2025, according to some estimates. In the next few years, drone use will become more prevalent on farms large and small, from reconnaissance to security. The information

collected by drones on farms is often used to make better agronomic decisions and is part of a system commonly referred to as "precision farming." In many places, drones have already become an integral part of large-scale precision farming operations. Data collected by drones that record fields helps farmers plan planting and tilling for the best yields. Some reports indicate that the use of precision farming systems can increase yields by as much as 5%, a significant increase in an industry with typically low profit margins. The use of drones in agriculture not only increases efficiency and productivity, but also makes production more sustainable and environmentally friendly. Investment in such technologies is gradually becoming the standard of modern agribusiness, especially for those farms that seek to optimize resources and reduce costs.

Drones have great potential to transform agriculture in Ukraine and around the world. As technology advances in the future, drone production is expected to become cost-effective. The value of drones can encourage young people to work in the modern agricultural sector. The next agricultural revolution will be driven by drone data. Proper use of data can increase agricultural productivity without any negative consequences for the environment and at the same time improve farmers' livelihoods. Therefore, drones can become a part of agriculture in the future, helping farmers better manage their fields and resources in a sustainable way.

In the primary production sector, high-tech drones allow operators to automate some processes, such as planting, livestock management, or crop spraying. These potential applications of drones open up a new branch of agricultural processes, sometimes called precision farming.

Without a doubt, drones are becoming an integral part of agribusiness. They open up new opportunities for farmers, making processes more transparent and manageable. Innovation in this area continues to develop, and we can expect drones to become even more advanced and accessible in the future.

Key words: agriculture, drones, precision farming, fertilizers.

Мелконов Григорій Леонідович – к.т.н., доц., завідувач кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), melkonov78@snu.edu.ua

Єпіфанова Ольга Вікторівна - к.т.н., доц., доцент кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ)

Стаття подана 21.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-69-75>

УДК 62-83

STUDY OF OSCILLATORY PROCESSES IN ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

Rudniev Y.S., Romanchenko J.A.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАТРОННИХ СИСТЕМАХ

Руднів Є.С., Романченко Ю.А.

In the article an analysis of oscillatory processes occurring in electromechanical and electromechatronic systems is presented.

It has been shown that oscillations reflect the exchange of energy between accumulators via an active transmission channel. The oscillations reflect the exchange of energy between the storage devices via the active transmission channel. In mechanical systems, such accumulators are masses (moments of inertia), and the transmission channels are shaft lines. An electric motor is a universal converter of electromagnetic energy into mechanical energy and vice versa. It also contains two energy accumulators between which exchange is possible: the armature (rotor) winding, which contains electromagnetic energy, and the inertia on the shaft (the accumulation of mechanical energy). In the transmission channel, energy is converted from one form to another due to the presence of an excitation flow.

The authors note that in electromechanical and electromechatronic systems, electromechanical vibrations are also possible, in addition to mechanical ones. Both internal viscous friction in the shafting and losses in the machine's anchor circle damp these vibrations.

This article examines an electromechanical system that exhibits both types of oscillations. A unified structural diagram for any type of electromechanical electric drive system, as well as its mathematical model, is presented. A differential equation for the motor rotor motion with a stepwise increase in the control input signal was obtained. The values of the first derivatives at the initial instant were found. The damping coefficients and oscillation frequencies were determined.

An electromechanical system was modeled in MATLAB/Simulink using a structural diagram with a constant electromagnetic motor torque and specified parameters. The logarithmic damping decrement was

determined in the absence of mechanical damping and in the presence of shaft line losses.

The reaction of the electromechanical system to the sudden appearance of a control action at the input is presented, as well as the reaction in the absence of mechanical damping and when the anchor is powered from a current source, from which it is evident that in the absence of internal viscous friction in the shaft line, mechanical vibrations are still damped due to internal viscous friction in the engine itself.

Key words: *electric drive, engine, oscillatory processes, electromechanical system, internal viscous friction, mechanical damping.*

Introduction. Modern developments in science and technology are characterized by the rapid integration of electrical, mechanical, and information technologies, leading to the emergence of a new class of technical objects – electromechanical and electromechatronic systems. These systems form the basis of most modern technological processes, vehicles, robotic systems, precision mechanics devices, and automated production lines [1].

Electromechanical systems combine electrical and mechanical elements whose interaction enables the conversion of electrical energy into mechanical energy or vice versa. Such systems include electric drives, generators, electrically controlled transmissions, and industrial robot drives. Their effectiveness is determined by the coordination of the electrical and mechanical subsystems, their dynamic characteristics, and their ability to operate

reliably under external disturbances and load changes [2].

Along with the development of sensor technology, microprocessor technology, and digital control systems, a new level of technical integration has emerged: electromechatronic systems [3]. They integrate electromechanical, electronic, computer, and information components into a single structure, creating intelligent, controlled systems. Such systems are capable of not only performing specified functions but also adapting to changing external conditions, analyzing the state of their own subsystems, and performing self-diagnostics.

Oscillatory processes play a key role in shaping the dynamic characteristics of both electromechanical and electromechatronic systems, determining their stability, reliability, and energy efficiency. In modern electric drives, automatic control systems, robotic and power plants, as well as electromechatronic complexes and systems, oscillations arise from the interaction of electrical, magnetic, and mechanical subsystems. Their occurrence is determined by both the design features of the system and external influences, changes in load, or operating modes [4].

Oscillatory processes can arise due to:

- disturbance of the system balance (sudden change in load, supply voltage, resistance moment, etc.);
- elastic deformations of shafts or couplings;
- feedback electromechanical connection between the armature current and the rotation speed;
- resonance phenomena, when the natural frequency of the mechanical part of the system coincides with or is close to the disturbance frequency.

Types of oscillations:

1. Natural oscillations occur when a system deviates briefly from its equilibrium state without external disturbance. They are characterized by a natural frequency ω_0 and attenuation coefficient ξ .

2. Forced oscillations – caused by periodic external forces or torques (e.g., power supply pulsations). They can be amplified if the excitation frequency is close to the system's natural frequency (resonance).

In an electromechanical system, electrical and mechanical oscillations are interconnected. In such a system, a change in current causes a change in the electromagnetic torque, which, in turn, changes the rotational speed [5]. The change in speed affects the rotational EMF, which again changes the current, thus creating a closed cycle of energy exchange. This leads to electromechanical oscillations, which can be [6]:

- damped if the system has sufficient internal friction (energy losses);
- persistent harmonics, if the losses are compensated by external disturbance;
- divergent (unstable) if the feedback is positive (for example, if the regulator is incorrectly configured).

Studying the nature of oscillatory processes is a pressing issue in modern electromechanics and electromechatronics, as excessive or uncontrolled oscillations can lead to reduced system efficiency, increased energy losses, noise, vibration, and premature wear of components. At the same time, the rational use of controlled oscillations can form the basis for the development of highly sensitive sensor systems, resonant converters, and intelligent electric drives [7, 8].

The relevance of the study is due to the need to develop new methods for modeling, analysis and damping of oscillatory processes to improve the dynamic stability and control accuracy of electromechanical and electromechatronic systems.

The objective to study the patterns of occurrence and development of oscillatory processes in electromechatronic systems, identify the main factors influencing their dynamics, and analyze approaches to reducing the amplitude and intensity of unwanted oscillations.

Research results.

Oscillations represent the exchange of energy between accumulators through an active transmission channel. In mechanical systems, these accumulators are masses (moments of inertia), and through the channels, shaft lines. An electric motor is a universal converter of electromagnetic energy into mechanical (kinetic) energy and vice versa. It also has two energy accumulators between which exchange is possible: the armature (rotor) winding, which contains electromagnetic energy, and the inertia on the shaft (the accumulation of mechanical energy). In the transmission channel, energy is converted from one form to another due to the presence of an excitation flux. The forward channel is the conversion "current – electromagnetic torque", while the reverse channel is the conversion "speed – back EMF."

An increase in speed (kinetic energy) is accompanied by an increase in EMF, which reduces the machine current (electromagnetic energy) – electromagnetic energy flows from the armature winding into the kinetic energy of the armature (rotor). The presence of active resistance in the winding makes the transmission channel less than ideal (dissipation). With high resistance, the energy lost during this transfer makes it impossible to

return the kinetic energy of mechanical vibrations (as speed decreases) back to the armature winding.

Thus, in an electromechanical system, in addition to the mechanical oscillations mentioned above, electromechanical oscillations are also possible. Both internal viscous friction in the shafting and losses in the machine's armature chain dampen these oscillations. Furthermore, the negative internal coupling of the armature winding's EMF (speed) affects the mechanical oscillations in the shafting in the same way as the internal viscous friction, reducing their amplitude and frequency.

Let's consider an electromechanical system in which both types of oscillations are observed. Its structural diagram for any type of electric drive system can be represented as shown in Figure 1.

The following notations are used in it:

ω_0 – ideal idle speed of the engine, s^{-1} ;

K – control action transmission coefficient,

for the thyristor converter-motor system:

$$K = K_G / CF;$$

for a frequency-controlled electric drive –

$$K = 2\pi K_{TF} / p_n;$$

for cascade asynchronous electric drives and double-feed machines –

$$K = K_G \omega_{0N} / K_{ce} E_{RN},$$

where K_G – gain factor of the valve converter (rectifier – inverter);

K_{TF} – frequency converter transmission coefficient ($K_{TF} = \Delta f / \Delta U_d$);

p_n – number of pole pairs of an asynchronous motor;

K_{ce} – gain coefficient for the EMF of the bridge rectification circuit of the rotary converter ($K_{ce} = 1,28 \div 1,35$);

γ – coefficient of rigidity of the mechanical characteristics of the engine, Nms, $\gamma = M_N / \Delta \omega_{(N)}$;

E_{RN} – nominal value of rotor EMF, V;

T_e – the value of the electromagnetic time constant of the main circuit of the engine, s;

$T_e = L_e / R_e$ – for the thyristor converter-motor system;

$T_e = 1 / (\omega_{0N} S_{(c)})$ – for frequency-controlled asynchronous electric drive;

$T_e = L_d / R_{dcr}$ – for cascade asynchronous electric drive;

L_e, R_e – equivalent value of inductance and active resistance of the armature circuit of the thyristor converter-motor;

L_d, R_{dcr} – equivalent value of inductance and active resistance of the rectified current circuit of the rotor of the asynchronous valve cascade, H, Ohm;

ω_{0N} – synchronous speed of the motor at the rated voltage frequency ($\omega_{0N} = 2\pi f_N / p_n$), s^{-1} ;

$S_{(c)}$ – the value of the critical slip of the rotor at the nominal voltage frequency, taking into account the inductance and active resistance of the frequency converter;

C_{12}, β_{12} – coefficients of shaft rigidity and viscous internal friction in it, respectively, Nms.

The mathematical model of EMS has the following form [1]:

$$\left. \begin{aligned} M - C_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt - \beta_{12} (\omega_1 - \omega_2) &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ C_{12} \int (\omega_1 - \omega_2) dt - M_{C2} &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ T_e \frac{dM}{dt} + M &= \gamma (KU_c - \omega_1). \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

After substitutions and transformations, we have the differential equation of motion of the motor rotor (ω_1) with a stepwise increase in the control signal U_c at the input and $M_{C2} = const$:

$$\begin{aligned} &\frac{T_M T_e}{\Omega_{12}^2} \frac{d^4 \omega_1}{dt^4} + \left(\frac{T_M}{\Omega_{12}^2} + \frac{2\alpha_{BT} T_e T_{M2}}{\Omega_{12}^2} \right) \frac{d^3 \omega_1}{dt^3} + \\ &+ \left(\frac{K_j}{\Omega_{12}^2} + \frac{2\alpha_{BT} T_{M2}}{\Omega_{12}^2} + T_e T_M \right) \frac{d^2 \omega_1}{dt^2} + T_M \frac{d\omega_2}{dt} + \omega_1 = \\ &= K \left[\frac{K_j}{\Omega_{12}^2} \frac{d}{dt} U_y + U_y \right] - \\ &- \frac{1}{\gamma} \left[\frac{2\alpha_{BT} T_e}{\Omega_{12}^2} \frac{d^2 M_{C2}}{dt^2} + \left(\frac{2\alpha_{BT}}{\Omega_{12}^2} + T_e \right) \frac{dM_{C2}}{dt} + M_{C2} \right] \end{aligned}$$

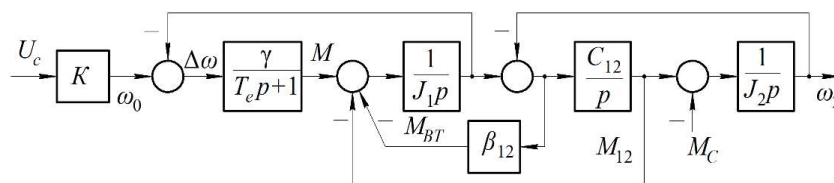


Fig. 1. Unified structural diagram of a two-mass electromechanical system

Similarly, the differential equation for the second mass is obtained:

$$\begin{aligned} & \frac{T_M T_e}{\Omega_{12}^2} \frac{d^4 \omega_2}{dt^4} + \left(\frac{T_M}{\Omega_{12}^2} + \frac{2\alpha_{BT} T_e T_{M2}}{\Omega_{12}^2} \right) \frac{d^3 \omega_2}{dt^3} + \\ & + \left(\frac{K_j}{\Omega_{12}^2} + \frac{2\alpha_{BT} T_{M2}}{\Omega_{12}^2} + T_e T_M \right) \frac{d^2 \omega_2}{dt^2} + \\ & + T_M \frac{d\omega_2}{dt} + \omega_2 = K U_y - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{T_M T_e}{\Omega_{12}^2 T_{M2}} \frac{d^3 M_{C2}}{dt^3} + \right. \\ & \left. \left(\frac{2\alpha_{BT} T_e}{\Omega_{12}^2} + \frac{T_M}{\Omega_{12}^2 T_{M2}} \right) \frac{d^2 M_{C2}}{dt^2} + \right. \\ & \left. + \left(\frac{K_j}{\Omega_{12}^2 T_{M2}} + \frac{2\alpha_{BT}}{\Omega_{12}^2} + T_e \right) \frac{dM_{C2}}{dt} + M_{C2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

where T_M, T_{M2} – electromechanical time constants of the electric drive, s;

$$T_M = (J_1 + J_2) \Delta \omega_{(N)} / M_N, \quad T_{M2} = J_2 \Delta \omega_{(N)} / M_N;$$

Ω_{12} – natural frequency of oscillations of a two-mass mechanical system;

K_j – coefficient of mass ratio in a two-mass mechanical system $K_j = (J_1 + J_2) / J_1 = 1 + J_2 / J_1$;

M_{C2} – load moment on the shaft of the second mass, Nm.

Let's assume that both types of oscillations – mechanical and electromechanical – are observed in an electromechanical system. In this case, the solution to differential equation (2) is:

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = & e^{\alpha_1 t} (C_{1\omega} \cos \nu t + C_{2\omega} \sin \nu t) + \\ & + e^{\alpha_3 t} (C_{3\omega} \cos \Omega_p t + C_{4\omega} \sin \Omega_p t) + K U_c - M_C / \gamma, \end{aligned} \quad (3)$$

where α_1, α_3 – the attenuation coefficients of electromechanical and mechanical oscillations, respectively, 1/s;

ν, Ω_p , – circular frequencies of the specified oscillations, rad/s;

$C_{j\omega}$ – constants of integration, defined as the solution of a system of linear equations for the initial conditions of the process (a jump-like increase in the control action U_c at the input with a constant load M_{C2}):

$$\begin{aligned} & C_{1\omega} + C_{3\omega} = \omega_1(0); \\ & \alpha_1 C_{1\omega} + \nu C_{2\omega} + \alpha_3 C_{3\omega} + \Omega_p C_{4\omega} = \omega_1'(0); \\ & C_{1\omega} (\alpha_1^2 - \nu^2) + C_{3\omega} (\alpha_3^2 - \Omega_p^2) + 2C_{2\omega} \alpha_1 \nu + \\ & + 2C_{4\omega} \alpha_3 \Omega_p = \omega_1''(0); \\ & C_{1\omega} \alpha_1 (\alpha_1^2 - 3\nu^2) - C_{2\omega} \nu (\nu^2 - 3\alpha_1^2) + \\ & + C_{3\omega} \alpha_3 (\alpha_3^2 - 3\Omega_p^2) - C_{4\omega} \Omega_p (\Omega_p^2 - 3\alpha_3^2) = \omega_1'''(0), \end{aligned} \quad (4)$$

where $\omega_1(0), \omega_1'(0), \omega_1''(0), \omega_1'''(0)$ are the initial values of the rotor speed and its derivatives.

Knowing the initial values of the coordinates of the state of the system (1): $\omega_1(0) = \omega_2(0) = 0$; $M(0) = 0$, we find the value of the derivatives of these coordinates at $t = 0$. We write the system of equations (1) in Cauchy form (in operator form)

$$\begin{cases} p\omega_1 = \frac{M}{J_1} - \frac{C_{12}}{J_1} \frac{1}{p} (\omega_1 - \omega_2) - \frac{\beta_{12}}{J_1} (\omega_1 - \omega_2) \\ p\omega_2 = -\frac{M_{C2}}{J_2} + \frac{C_{12}}{J_2} \frac{1}{p} (\omega_1 - \omega_2) \\ pM = \frac{\gamma K U_c - \gamma \omega_1}{T_e} - \frac{1}{T_e} M \end{cases} \quad (5)$$

Substituting the values $\omega_1(0), \omega_2(0), M(0)$, into (5), we find the value of the first derivatives at the initial moment of time. Differentiating the equation of system (5), we obtain expressions for the second and third derivatives of the state coordinates. As a result, we will have

$$\begin{aligned} \omega_1'(0) = & 0; \quad \omega_2'(0) = -\frac{M_{C2}}{J_2}; \quad M'(0) = \frac{K U_c \gamma}{T_e}; \\ \omega_1''(0) = & \frac{K U_c \gamma}{T_e J_1} - \frac{\beta_{12} M_C}{J_1 J_2}; \quad \omega_2''(0) = 0; \quad M''(0) = -\frac{K U_c \gamma}{T_e^2}; \\ \omega_1'''(0) = & -\frac{K U_c \gamma}{J_1 T_e} \left(\frac{\beta_{12}}{J_1} + \frac{1}{T_e} \right) - \frac{M_{C2}}{J_1 J_2} \left(C_{12} + \frac{\beta_{12}^2}{J_1} \right); \\ \omega_2'''(0) = & \frac{C_{12} M_{C2}}{J_2^2}; \\ M'''(0) = & \frac{K U_c \gamma}{T_e^2} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{\gamma}{J_1} \right) + \frac{\gamma \beta_{12} M_{C2}}{T_e J_1 J_2}. \end{aligned} \quad (6)$$

By substituting the initial values of the velocity and its derivatives (6) into (4) with known $\alpha_1, \alpha_2, \nu, \Omega_p$, we can determine $C_{j\omega}$.

The attenuation coefficients and oscillation frequencies are determined by their characteristic equations according to the differential equation

$$\begin{aligned} & p^4 + \left(\frac{1}{T_e} + 2\alpha_{BT} \frac{T_{M2}}{T_M} \right) p^3 + \left(\frac{K_j}{T_e T_M} + \frac{\beta_{12} K_j}{\gamma T_e T_M} + \Omega_{12}^2 \right) \times \\ & \times p^2 + \frac{\Omega_{12}^2}{T_e} p + \frac{\Omega_{12}^2}{T_e T_M} = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

taking its roots as complex conjugates $p_1 = \alpha_1 + j\nu$, $p_2 = \alpha_1 - j\nu$, $p_3 = \alpha_3 + j\Omega_p$, $p_4 = \alpha_3 - j\Omega_p$:

$$(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4) = 0;$$

$$p^4 - 2(\alpha_1 + \alpha_3)p^3 + [(\alpha_1^2 + \nu^2) + (\alpha_3^2 + \Omega_p^2) + 4\alpha_1\alpha_3]p^2 - 2[\alpha_3(\alpha_1^2 + \nu^2) + \alpha_1(\alpha_3^2 + \Omega_p^2)]p + (\alpha_1^2 + \nu^2)(\alpha_3^2 + \Omega_p^2) = 0, \quad (8)$$

Equating the coefficients of the same powers of p equations (7) and (8) yield a system of equations, solving which we determine the roots. The resulting system will be quite complex; an approximate solution will be as follows:

$$\alpha_1 \cong -\frac{1}{2T_e}; \quad \alpha_3 \cong -\alpha_{BT} \frac{T_{M2}}{T_M}; \quad \nu \cong \frac{1}{2T_e} \sqrt{\frac{4T_e - T_M}{T_M}};$$

$$\Omega_p \cong \sqrt{\Omega_{12}^2 - \alpha_{BT} \frac{T_{M2}}{T_M^2} (\alpha_{BT} T_{M2} - 2)}. \quad (9)$$

Figure 2 shows the response of the electromechanical system to the sudden appearance of the control input U_c . In the absence of internal viscous friction in the shaft line ($\beta_{12} = 0$), mechanical vibrations are still damped due to the internal viscous friction in the motor itself ($\gamma \neq 0$) – Fig. 3. Only in its absence, that is, at $\gamma = 0$, or when the motor is powered from a current source (and not voltage), is there no damping of mechanical vibrations (Fig. 4).

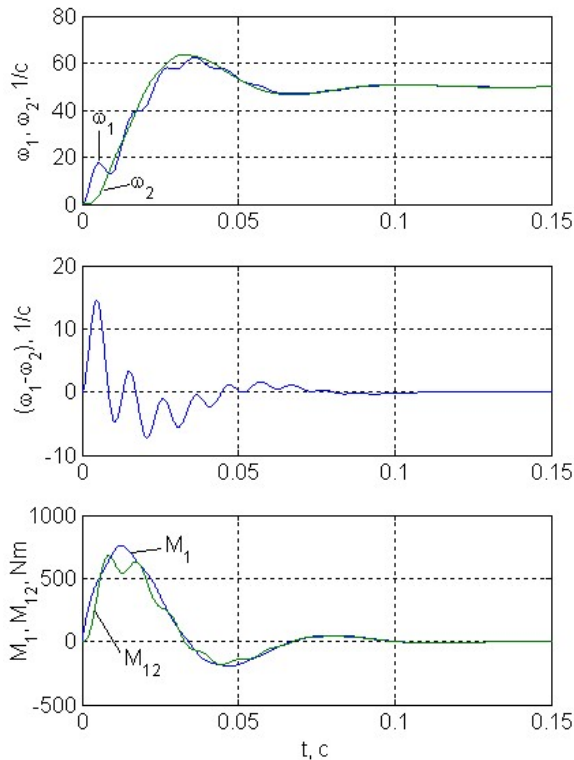


Fig. 2. Response of an electromechanical system to a sudden appearance of a control action [1]

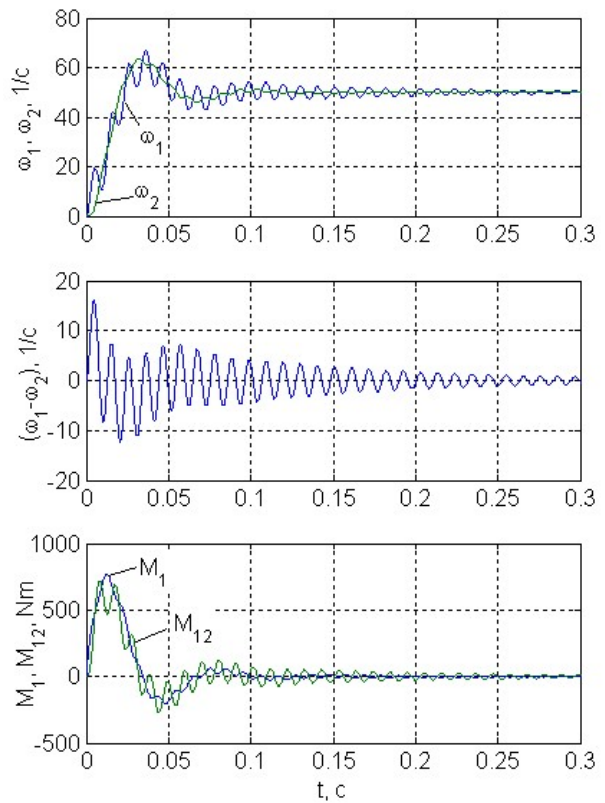


Fig. 3. Response of an electromechanical system in the absence of mechanical damping [1]

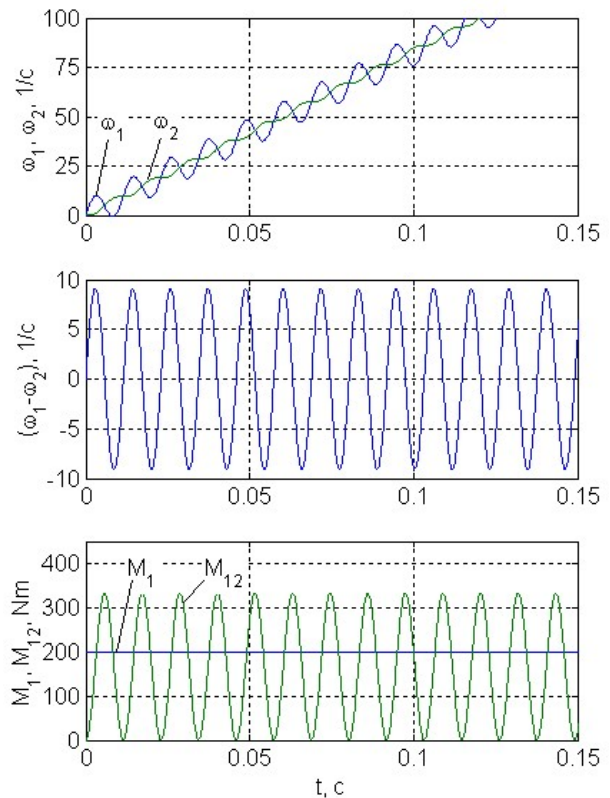


Fig. 4. Response of an electromechanical system in the absence of mechanical damping [1]

An electromechanical system with the following parameters was simulated in the MATLAB/Simulink environment:

$$C_{12} = 10 \cdot 10^3 \text{ Nm}; \quad J_1 = 0.04 \text{ kgm}^2; \quad \omega_0 = 50 \text{ s}^{-1}; \\ \beta_{12} = 3.2 \text{ Nms}; \quad J_2 = 0.2 \text{ kgm}^2; \quad T_e = 0.01 \text{ s}. \\ \gamma = 30 \text{ Nms};$$

The model was formed in accordance with the structural diagram in Fig. 1. When simulating the power supply mode from a current source, the electromagnetic torque of the motor (M_1) was set constant and equal to 200 Nm.

In the absence of mechanical damping ($\beta_{12} = 0$), the oscillations are damped with a logarithmic decrement of 0.093. In the presence of losses in the shaft line, the logarithmic decrement approaches 0.5.

Conclusions. Thus, two types of oscillations are possible in an electromechanical system: mechanical and electromechanical. Both the internal viscous friction in the shafting and the losses in the machine's armature circuit damp these oscillations. Furthermore, the negative internal coupling of the armature winding's EMF affects the mechanical oscillations in the shafting in the same way as the internal viscous friction, reducing their amplitude and frequency.

Based on the results of modeling the electromechanical system in MATLAB/Simulink, it was found that even without internal viscous friction in the shaft line, mechanical vibrations are still damped due to the internal viscous friction in the motor itself. Only in its absence, or when the motor is powered by a current source (rather than a voltage source), is there no damping of mechanical vibrations.

In the absence of mechanical damping, oscillations are damped with a logarithmic decrement of 0.093. In the presence of losses in the shaft line, the logarithmic decrement approaches 0.5.

Oscillatory processes have a significant impact on the stability, precision, and efficiency of both electromechanical and electromechatronic systems. In automatic control systems, oscillatory processes can cause overshoot, self-oscillation, or even instability, leading to deterioration in speed or position control. In electric drives, oscillations cause mechanical vibrations, noise, and shaft and coupling overload, reducing equipment lifespan. In generators, oscillatory phenomena lead to voltage and current pulsation, which reduces power quality

and can place additional strain on electrical networks.

Electromechatronic systems combine electrical, mechanical, and information subsystems interacting through sensors, microprocessor controllers, and actuators. Oscillatory processes in such systems are complex and affect multiple levels simultaneously. At the sensor level, they can cause measurement noise, feedback errors, and positioning inaccuracies. At the control level, signal fluctuations or data transmission delays lead to digital self-oscillations or oscillatory modes due to sampling. At the actuator level, vibrations caused by electromagnetic forces are transmitted to mechanical elements, reducing the precision of actions (for example, in robotic manipulators or mechatronic platforms). At the integrated system level, the interaction of electrical, mechanical, and software components can lead to electromechatronic resonances, complicating control and requiring active damping or adaptive control.

The importance of the analysis of oscillatory processes.

To ensure reliable and safe operation of electromechanical and electromechatronic systems, it is necessary:

- analyze frequency properties and natural frequencies of mechanical structures;
- correctly select damping parameters and feedback controls;
- apply digital filters, active damping and adaptive control algorithms capable of compensating for the effects of vibrations in real time;
- use sensor diagnostics to detect hazardous vibrations and predict vibration loads.

Thus, research and control of oscillatory processes in electromechanical and electromechatronic systems are key to increasing the accuracy of positioning and speed control, ensuring the stability of automatic control systems, reducing mechanical wear of components, and improving the energy efficiency and reliability of modern technological systems.

References

1. Shevchenko I.S., Morozov D.I. Dynamics of complex electromechanical systems: navchal'nyj posibnyk. Alchevs'k: DonDTU. 2008. 171 p.
2. Rudniev, Y., Romanchenko, J., Romanchenko, O. Study of Impact Phenomenon in Mechatronic Systems Proceedings of the 2022 IEEE 4th

- International Conference on Modern Electrical and Energy System, MEES 2022, 2022, p. 1-6.
3. Tamm C., Perfetto S. Design and Optimization of Mechatronic Systems Using a Holistic and Parametric Simulation Approach IFAC-PapersOnLine, Vol.52, 271-276p.
 4. Kundur P. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994 Technology & Engineering - 1176 p.
 5. Rueda-Medina A. C. Fiorotti R., Oliveira Rocha H.R., Simonetti D. Novel sensitivity models for electromechanical oscillations analysis in active distribution networks considering electrical vehicles optimal charging. Renewable Energy 232(4), 2024.
 6. Zuo G., Wong L. A review of recent active vibration control techniques, arXiv, 2016.
 7. Baltas G.N., Lai N.B., Tarraso A., Marin L., Blaabjerg F. and Rodriguez P. AI-Based Damping of Electromechanical Oscillations by Using Grid-Connected Converter, Frontiers in Energy Research, Volume 9, 2021.
 8. Berizzi A., Bosisio A., Simone R., Vicario A. Real-time identification of electromechanical oscillations through Dynamic Mode Decomposition, IET Research / related works, 2020.

Руднев Є. С., Романченко Ю. А. Дослідження коливальних процесів в електромехатронних системах.

В статті представлений аналіз коливальних процесів, що відбуваються в електромеханічних та електромехатронних системах.

Показано, що коливальні процеси відіграють ключову роль у формуванні динамічних характеристик як електромеханічних так й електромехатронних систем і визначають їхню стабільність, надійність та енергоефективність. Коливання відображають обмін енергіями між накопичувачами через активний канал передачі. У механічних системах такими накопичувачами є маси (моменти інерції), а каналами – валопроводи. Електричний двигун є універсальним перетворювачем електромагнітної енергії в механічну і навпаки. У ньому також є два накопичувачі енергії, між якими можливий обмін – обмотка якоря (ротора), в якій міститься електромагнітна енергія, і інерційність на валу (накопичення механічної енергії). В каналі передачі відбувається перетворення енергії з одного виду в інший завдяки наявності потоку збудження.

Авторами зазначено, що в електромеханічних та електромехатронних системах, окрім механічних коливань, можливі також і електромеханічні. Як внутрішнє в'язке тертя у валопроводах, так і втрати у якірному колі машини роблять ці коливання загасаючими.

В статті розглянуто електромеханічну систему, в якій спостерігаються обидва види коливань. Подано уніфіковану структурну схему для будь-якого типу електромеханічної системи електропривода, а також її математичну модель.

Отримано диференціальне рівняння руху ротора двигуна при стрибкоподібному збільшенні керуючого сигналу на вході. Знайдено значення перших похідних в початковий момент часу. Визначено коефіцієнти загасання та частоти коливань.

Виконано моделювання електромеханічної системи в середовищі MATLAB/Simulink відповідно до структурної схеми з постійним значенням електромагнітного моменту двигуна та заданими параметрами. Визначений логарифмічний декремент затухання коливань при відсутності механічного демпфування та при наявності втрат в валопроводі.

Наведено реакцію електромеханічної системи на стрибкоподібну появу на вході керуючого впливу, а також реакції при відсутності механічного демпфування і живленні якоря від джерела струму., з яких видно, що при відсутності внутрішнього в'язкого тертя у валопроводі механічні коливання все одно загасають завдяки внутрішньому в'язкому тертю у самому двигуні.

Ключові слова: електропривод, двигун, коливальні процеси, електромеханічна система, внутрішнє в'язке тертя, механічне демпфування.

Руднев Є.С. – д.т.н., доц., професор кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, rudnev_es@snu.edu.ua

Романченко Ю.А. – к.т.н., доц., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, romanchenko_ja@snu.edu.ua

Стаття подана 13.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-76-80>

УДК 621.316

ДІЕЛЕКТРИЧНЕ СЕРЕДОВИЩЕ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ ОБЛАДНАННІ

Філімоненко Н.М., Філімоненко К.В.

DIELECTRIC ENVIRONMENT IN HIGH-VOLTAGE EQUIPMENT

Filimonenko N. M., Filimonenko K. V.

Стаття присвячена аналізу сучасних альтернатив SF₆ у високовольтному обладнанні електроенергетичних систем з акцентом на їхні електричні характеристики, безпеку та екологічну ефективність.

Протягом тривалого часу SF₆ залишався основним діелектричним середовищем у високовольтному обладнанні електроенергетичних систем. Проте, враховуючи його надзвичайно тривалий період перебування в атмосфері та високий потенціал глобального потепління, уряди спрямували зусилля на скорочення викидів цього газу. У відповідь промисловість почала впроваджувати технології без використання SF₆ у традиційних застосуваннях, зокрема у розподільчих пристроях, автоматичних вимикачах та лініях або шинах під високою напругою.

SF₆ – це інертний та нетоксичний газ, що має велике значення для електричних розподільчих пристроїв, що використовуються для розподілу та передачі електроенергії по всьому світу. Це обладнання розміщується у вузлах мережі для відключення струмів короткого замикання, як тільки вони виникають. SF₆ – це газ, що ізолює напругу, який має втричі кращі ізоляційні властивості, ніж повітря, краще, ніж будь-який інший газ. Таким чином, він дозволяє проектувати невеликі закриті та газонепроникні розподільчі пристрої з малим розміром, що має визнані переваги в суворих умовах навколишнього середовища та з обмеженим простором, наприклад, у вітрових вежах. Наразі SF₆ не має економічно та енергоефективної альтернативи для розподільчих пристроїв вище 52 кВ, тобто для використання в мережі передачі, де він застосовується завдяки своїм чудовим можливостям переривання струму.

Серед безSF₆ рішень відзначаються газові суміші на основі фторованих сполук із низьким кліматичним впливом, зокрема фторнітрил (3M™ Novec™ 4710) та фторкетон (3M™ Novec™ 5110). Застосування цих сумішей у елегазовому обладнанні дозволяє

зменшити викиди парникових газів більш ніж на 99% порівняно з SF₆, зберігаючи високі електричні та експлуатаційні характеристики. У статті представлені основні компоненти альтернативних газових сумішей та оновлені дані щодо їх продуктивності, безпеки та екологічної ефективності у сучасних електроенергетичних системах.

Ключові слова: високовольтне обладнання; гексафторид сірки; SF₆; ізоляція; діелектричне середовище; альтернатива елегазу; фторрокетон; фторнітрил.

Вступ. Гексафторид сірки (SF₆) є інертним, нетоксичним газом, що відіграє ключову роль у функціонуванні електричних розподільчих пристроїв, призначених для передавання та розподілу електроенергії на глобальному рівні. Унікальне поєднання його хімічних, електричних і фізичних властивостей зумовило широке використання SF₆ як високоефективного діелектричного середовища в елегазових розподільчих установках (ЕРУ), газових вимикачах (ГВ) та елегазових лініях (ЕЛ). Таке обладнання є невід'ємною частиною енергетичних систем, забезпечуючи відключення струмів короткого замикання безпосередньо в момент їх виникнення.

SF₆ вирізняється високими ізоляційними характеристиками – його діелектрична міцність утричі перевищує аналогічний показник повітря, що робить цей газ ефективнішим за будь-яке інше газоподібне ізоляційне середовище. Завдяки цьому стає можливим проектування компактних, герметичних і високонадійних розподільчих пристроїв, придатних для експлуатації в умовах

обмеженого простору та підвищених вимог до стійкості доквілля.

Постановка проблеми. На сьогодні гексафторид сірки не має економічно обґрунтованих та енергоефективних альтернатив для обладнання, що працює з напругою понад 52 кВ. Саме тому SF₆ залишається незамінним у системах передавання електроенергії, де особливо важливими є його виняткові властивості з гасіння електричної дуги та забезпечення безперервності енергопостачання.

Водночас SF₆ є потужним парниковим газом із надзвичайно високим потенціалом глобального потепління. Через тривалий період перебування в атмосфері (приблизно 3200 років) навіть незначні викиди SF₆, як минулі, так і майбутні, спричиняють його накопичення та поступове зростання концентрації в атмосфері. У зв'язку з цим чинне європейське законодавство щодо фторвмісних газів [1,2] передбачає суттєве скорочення щорічних викидів SF₆ з електричних розподільчих установок, навіть попри вже досягнуті результати завдяки галузевим ініціативам.

Метою роботи є характеристика основних джерел емісії SF₆. Також розглянуто технічні можливості зниження викидів SF₆ – як шляхом удосконалення конструкції розподільчих пристроїв, так і завдяки впровадженню більш ефективних методів контролю за поведінням із газом на етапах виробництва та випробувань обладнання.

Результати дослідження. Глобальний радіаційний вплив, спричинений усіма фторованими газами (F-газами), становить приблизно 12,5% впливу всіх техногенних парникових газів, включаючи CO₂, CH₄ та N₂O. Вплив глобального потепління F-газів все ще домінує в озоноруйнівних газах, таких як CFC, HC₁₄ та CC₁₄.

Наразі внесок SF₆ становить 0,15% від загального глобального радіаційного впливу всіх парникових газів, з тенденцією до зростання. Його атмосферна концентрація постійно контролюється в кількох місцях світу, і процес глобального розподілу добре вивчений. SF₆ швидко поширюється по всьому світу. Час змішування між північною та південною півкулями становить від 1 до 1,5 років [3]. Таким чином, локальні викиди SF₆ розподіляються в межах цього періоду часу по всьому світу та виявляються як глобально зростаюча концентрація в атмосфері.

Технічні можливості зниження викидів SF₆ існують як шляхом удосконалення конструкції розподільчих пристроїв, так і завдяки впровадженню більш ефективних методів контролю за поведінням із газом на етапах виробництва та випробувань обладнання.

Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (ПКЗК ООН) збирає дані про інвентаризацію та викиди F-газів з 42 країн світу. Загальний обсяг річних викидів SF₆ із сектора електричних розподільчих пристроїв включається до загального об'єму парникових газів.

Згідно з даними про викиди в EDGAR, електрообладнання, що використовує SF₆, становить 58% усіх глобальних викидів (розрахунок 2008 року). Види джерел, зібрані в різних секторах, відрізняються залежно від країни та залежать від місцевих галузей промисловості, які використовують SF₆ для різних цілей.

Промислове виробництво сучасних розподільчих пристроїв поєднує випробування на герметичність та заповнення газом SF₆. Процес повністю автоматичний і виключає можливість роботи з SF₆ до успішного проходження випробування на герметичність. Для типової газорозподільної станції з трубопроводами характерним є оснащення системою, яка спочатку відкачує повітря всередині розподільчого пристрою та заповнює його гелієм, потім відкачує гелій і, нарешті, заповнює розподільчий пристрій необхідною кількістю газу SF₆.

З'єднувальні труби складаються зі зварних з'єднань та переходів для зменшення муфт та фітінгів, які мають потенційну ймовірність витоку. Розподільний пристрій залишається підключеним до системи заповнення протягом усього циклу випробувань і автоматично від'єднується в кінці. Перед від'єднанням труб SF₆, що залишився в трубах, збирається та повторно використовується для наступного заповнення. Робота з SF₆ – практично без викидів.

Сніфер – аналізатор, чутливий до елегазу, розміщується поблизу розподільчого пристрою з елегазом та повільно переміщується по його поверхні, зокрема по всіх фланцях.. Для підтвердження герметичності великих високовольтних розподільчих пристроїв використовується метод сніфера.

Щорічний моніторинг, що проводиться в рамках добровільних зобов'язань виробників та користувачів розподільчих пристроїв, доводить

постійне скорочення викидів SF₆. Про постійне скорочення викидів SF₆ від електричних розподільчих пристроїв також повідомляють такі країни, як Німеччина, Франція та Норвегія, і це має бути доцільним у довгостроковій перспективі для кожної країни світу.

Протягом багатьох років SF₆ був кращим діелектричним середовищем в електроенергетичних системах, особливо у високовольтному елегазовому обладнанні. Однак, усвідомлюючи, що SF₆ має надзвичайно довгий термін життя в атмосфері та дуже високий потенціал глобального потепління, уряди прагнули скорочення викидів від газонаповненого обладнання. На жаль, саме ті властивості, які роблять SF₆ ідеальним ізоляційним газом, а саме хімічна інертність, є тими ж властивостями, які роблять його надзвичайно довговічним в атмосфері.

Електроенергетична промисловість відреагувала на цю екологічну проблему, застосовуючи технології без SF₆ до ширшого кола застосувань, де традиційно використовувався SF₆, включаючи елегазові розподільчі пристрої, елегазові автоматичні вимикачі та елегазові лінії або шини. Деякі з цих рішень без SF₆ включають газові суміші, що містять фторовані сполуки, які мають низький вплив на клімат, серед них фторнітрил та фторкетон, розроблені як ізоляційний газ 3M™ Novac™ 4710 та ізоляційний газ 3M™ Novac™ 5110 відповідно. Як фторнітрильні, так і фторкетонові суміші успішно використовуються в елегазовому обладнанні, яке зараз працює в електромережі, де вони зменшують викиди парникових газів більш ніж на 99% порівняно з SF₆.

Визначення життєздатних альтернатив SF₆ ускладнюється унікальним поєднанням властивостей, необхідних для діелектричних застосувань. Тому, будь-яка заміна SF₆ як ізоляційного газу повинна неявно мати певну форму реакційної здатності, щоб сприяти розкладанню в атмосфері та подолати екологічні проблеми. Матеріали також повинні бути негорючими та достатньо низькотоксичними, щоб забезпечити безпечне поводження з ними з використанням методів, подібних до тих, що зараз використовуються в промисловості. Альтернативи, безумовно, повинні мати дуже високу діелектричну міцність, забезпечуючи характеристики, максимально наближені до SF₆. Оскільки газонаповнене обладнання буде використовуватися в різних умовах, матеріали

повинні залишатися газоподібними вище очікуваних робочих температур цих систем.

Діелектричне середовище також має бути стабільним протягом терміну служби цього обладнання, не сприяючи корозії чи іншим негативним впливам на пристрій. Найголовніше, щоб бути сталими альтернативами, нові сполуки повинні мати прийнятні комбінації екологічних властивостей, включаючи відсутність потенціалу руйнування озонового шару та значне зменшення викидів парникових газів від цих застосувань порівняно з SF₆, оскільки це є основною причиною переходу на нові технології.

В результаті, електроенергетична промисловість почала впроваджувати газові суміші на основі цих сполук як альтернативу SF₆ протягом останніх кількох років [5]. Фторнітрил та фторкетон визнані в електроенергетичній промисловості як ізоляційний газ 3M™ Novac™ 4710 та ізоляційний газ 3M™ Novac™ 5110 відповідно [4]. У деяких публікаціях їх називають C4-FN або C5-FK, або навіть просто C4 або C5..

Властивості чистих ізоляційних газів Novac. Ізоляційні гази Novac демонструють кілька фізичних властивостей, подібних до SF₆. Вони є високофторованими, негорючими газами високої щільності з надзвичайно низькими температурами замерзання та чудовими діелектричними властивостями. При будь-якому заданому тиску чисті гази Novac демонструють напругу діелектричного пробою, яка перевищує напругу SF₆, як показано на рисунку [4]. Вимірюється за допомогою паралельних дискових електродів із зазором 2,5 мм.

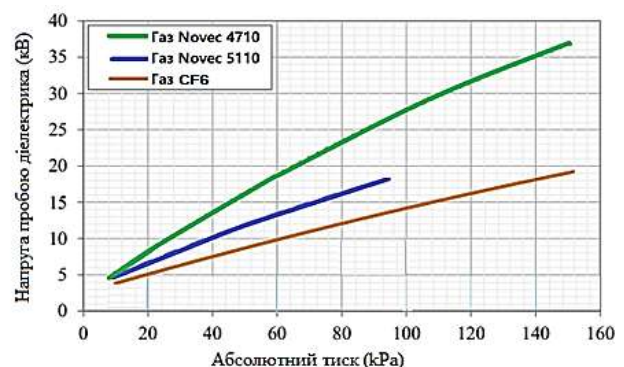


Рис. Напруга діелектричного пробою чистих газів

Численні системи, що використовують газові суміші Novac, наразі працюють у мережі, включаючи установки GIS, GCB та GIL. Ці

системи були розроблені для забезпечення продуктивності, порівнянної з аналогічним обладнанням SF₆ [5,6].

Додаткові міркування повинні бути застосованими під час роботи з будь-яким шкідливим газом після виникнення дугового горіння. У разі електричної дуги в обладнанні, що містить SF₆, можуть утворюватися високотоксичні побічні продукти розкладання, такі як HF, S₂F₁₀ та SO₂. Ці побічні продукти є дуже небезпечними та становлять потенційний ризик токсичності для тих, хто зазнає впливу. Залежно від характеру дугового горіння, газові суміші Novac також можуть зазнавати певного ступеня розкладання. Навіть якщо випробування показали, що дугові газові суміші Novac можуть бути менш небезпечними, ніж дугові суміші SF₆ [4], слід вживати аналогічних запобіжних заходів під час роботи з такими газовими сумішами. Працівники, які виконують процедури технічного обслуговування електричних вимикачів, що містять дугогасний елемент, повинні використовувати належні процедури поводження та носити засоби індивідуального захисту.

Висновки. SF₆ в електричних розподільчих пристроях становить менше 0,15% від загального глобального радіаційного впливу всіх парникових газів, проте спостерігається тенденція до зростання. Знаючи про високий потенціал парникового потепління та тривалий термін життя SF₆ в атмосфері, європейський сектор електротехнічної промисловості вжив різноманітних заходів для зменшення викидів SF₆. Викиди SF₆ були мінімізовані протягом усього життєвого циклу розподільчих пристроїв високої та середньої напруги завдяки передовим практикам промислового проектування та процедур поводження.

Газові суміші, що містять фторкетон або фторнітрил, ізоляційний газ Novac™ 5110 та ізоляційний газ Novac™ 4710 відповідно, впроваджуються як альтернативи SF₆ з низьким впливом на клімат. При використанні під вищим тиском ці газові суміші можуть забезпечити діелектричні характеристики, порівнянні з SF₆ у високовольтних системах. Безпека газів Novac була оцінена за допомогою серії токсикологічних досліджень, які демонструють, що профілі безпеки газових сумішей, що містять ці матеріали, безпечні для використання в газонаповненому обладнанні

Література

1. Регламент Європейського Парламенту і Ради (ЄС) № 517/2014 від 16 квітня 2014 року про фторовані парникові гази. Документ 984_031-14. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-14#Text
2. Коефіцієнт викидів парникових газів для виробництва та споживання електроенергії Аналітичне дослідження та опис методологічного підходу до розрахунку. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf
3. Kieffel, Y., Biquez, F., Vigouroux, D.; Ponchon, P., Schlernitzauer, A.; Magous, R., Cros, G., Owens, J. *Characteristics of g³—An alternative to SF₆*. CIREC Open Access Proc. J. 2017, 1, 54–57
4. Owens J., Xiao A., Bonk J., DeLorme M., Zhang A. *Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications* 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 6–10 September 2020, 1–4.
5. Stoller, P., Hengstler, J., Doiron, C.; Scheel, S., Simka, P., Müller, P. *Environmental Aspects of High Voltage Gas Insulated Switchgear That Uses Alternatives to SF₆ and Monitoring and Long-Term Performance of a Pilot Installation*; Cigré: Paris, France, 2018; Paper D1-202.
6. Laruelle, E.; Maksoud, L.; Kieffel, Y.; Lüscher, R.; Ficheux, A. *SF₆ Alternative—What to Learn from the High Voltage Experience*; Cigré: Madrid, Spain, 2019; Paper 0028.

References

1. Rehlament Yevropeys'koho Parlamentu i Rady (YES) № 517/2014 vid 16 kvitnya 2014 roku pro ftorovani parnykovi hazy. Dokument 984_03114. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_031-14#Text
2. Koeffitsiyent vykydiv parnykovykh haziv dlya vyrobnytstva ta spozhyvannya elektroenerhiyi Analitychne doslidzhennya ta opys metodolohichnoho pidkhotu do rozrakhunku. URL: https://gto.dixigroup.org/assets/images/files/DiXi_GTO_Electricity_Grid_EF.pdf
3. Kieffel, Y., Biquez, F., Vigouroux, D.; Ponchon, P., Schlernitzauer, A.; Magous, R., Cros, G., Owens, J. *Characteristics of g³—An alternative to SF₆*. CIREC Open Access Proc. J. 2017, 1, 54–57
4. Owens J., Xiao A., Bonk J., DeLorme M., Zhang A. *Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications* 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Beijing, China, 6–10 September 2020, 1–4.
5. Stoller, P., Hengstler, J., Doiron, C.; Scheel, S., Simka, P., Müller, P. *Environmental Aspects of High Voltage Gas Insulated Switchgear That Uses Alternatives to SF₆ and Monitoring and Long-*

Term Performance of a Pilot Installation; Cigré: Paris, France, 2018; Paper D1-202.

- Laruelle, E.; Maksoud, L.; Kieffel, Y.; Lüscher, R.; Ficheux, A. SF6 Alternative – What to Learn from the High Voltage Experience; Cigré: Madrid, Spain, 2019; Paper 0028.

Filimonenko N.M., Filimonenko K.V. Dielectric environment in high-voltage equipment.

The article is devoted to the analysis of modern alternatives to SF6 in high-voltage equipment of power systems, with a focus on their electrical performance, safety, and environmental efficiency.

For a long time, SF6 has remained the primary dielectric medium in high-voltage power system equipment. However, considering its extremely long atmospheric lifetime and high global warming potential, governments have focused efforts on reducing emissions of this gas. In response, the industry has begun implementing SF6-free technologies in traditional applications, including switchgear, circuit breakers, and high-voltage lines or busbars.

SF6 is an inert and non-toxic gas that is of great importance for electrical switchgear used for the distribution and transmission of electricity worldwide. This equipment is placed at network nodes to interrupt short-circuit currents as soon as they occur. SF6 is a voltage-insulating gas that has three times better insulating properties than air, better than any other gas. It therefore allows the design of small, enclosed and gas-tight switchgear with a small footprint, which has recognized advantages in harsh environmental

conditions and with limited space, such as in wind towers. SF6 currently has no cost-effective and energy-efficient alternative for switchgear above 52 kV, i.e. for use in the transmission network, where it is used due to its excellent current-interrupting capabilities.

Among the SF6-free solutions, gas mixtures based on fluorinated compounds with low climate impact stand out, particularly fluoro-nitrile (3M™ Novec™ 4710) and fluoro-ketone (3M™ Novec™ 5110). The use of these mixtures in gas-insulated equipment allows for a reduction of greenhouse gas emissions by more than 99% compared to SF6, while maintaining high electrical and operational performance. The article presents the key components of alternative gas mixtures and provides updated data on their performance, safety, and environmental effectiveness in modern power systems.

Keywords: *high-voltage equipment; sulfur hexafluoride; SF6; insulation; dielectric medium; SF6 gas alternative; fluoroketone; fluoronitrile.*

Філімоненко Ніна Миколаївна – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Філімоненко Костянтин Вадимович – к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, kostiantyn.kun@gmail.com

Стаття подана 05.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-81-90>

УДК 621.316.92:004.89:004.94

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ СИЛОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОСНОВІ БАГАТОРІВНЕВИХ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Цвєтков О.В.

INTELLIGENT METHODS FOR PREDICTING FAILURES OF POWER ELECTROTECHNICAL EQUIPMENT BASED ON MULTILEVEL DIGITAL TWINS

Tsvietkov O.V.

Стаття досліджує питання використання інтелектуальних підходів до передбачення несправностей силового електрообладнання з використанням багаторівневих цифрових двійників, які інтегрують фізичне моделювання, технології машинного навчання та аналіз великих масивів даних з метою підвищення надійності функціонування енергетичних мереж. Дослідження спрямоване на розробку та експериментальне підтвердження комплексної цифрової моделі, що синтезує *physics-informed* математичні рівняння з інтелектуальними алгоритмами глибокого навчання для досягнення вищої точності прогнозування залишкового експлуатаційного ресурсу та мінімізації кількості технічних несправностей у трансформаторному обладнанні та асинхронних електродвигунах. Методологічна основа дослідження базується на формуванні багатошарової архітектури цифрового двійника, що охоплює: сенсорний рівень агрегації даних, рівень фізичного моделювання електромагнітних, термічних та механічних явищ, аналітичний рівень застосування алгоритмів машинного навчання та рівень прийняття управлінських рішень із залученням елементів нечіткої логіки. Здобуті наукові результати засвідчили, що застосування гібридної моделі може дозволити досягти зниження середньоквадратичного відхилення похибок RMSE до рівня 0,031, скорочення MAPE до 2,8 % та зростання коефіцієнта F1-score до 0,93, що значно переважає результативність класичних діагностичних методик. Встановлено визначальний вплив повноти сенсорної інформації та періодичності актуалізації моделей на прогностичну точність, а також підтверджено спроможність системи до автоматичної адаптації при варіації режимів навантаження. Створена архітектура

продемонструвала резистентність до дефіциту даних і високий рівень узагальнювальної здатності ($CV < 0,06$). Прикладне значення дослідження виявляється у скороченні аварійних зупинок на 30-40 %, оптимізації експлуатаційних витрат і трансформації до ризик-орієнтованої стратегії керування технічним станом обладнання. Напрями подальших наукових пошуків включають стандартизацію технологій цифрових двійників, розвиток методів *explainable AI* та впровадження базових систем кібербезпеки для промислових цифрових платформ нового покоління.

Ключові слова: цифровий двійник, інтелектуальне прогнозування, машинне навчання, залишковий ресурс, технічна діагностика, енергетичне обладнання.

Вступ. Поточна фаза еволюції енергетичного сектору визначається масштабною цифровою трансформацією та зміщенням парадигми від конвенційних методів експлуатації до інтелектуалізованих систем управління, що реалізують неперервний моніторинг, аналітичне оброблення та прогностичне моделювання технічного стану об'єктів енергетичної інфраструктури. Інтенсифікація навантажень на силове електротехнічне обладнання, ускладнення архітектури енергосистем і підвищення критеріїв надійності актуалізують потребу у впровадженні інноваційних методів технічної діагностики та обслуговування, що ґрунтуються на концепції цифрових двійників та інтелектуальних алгоритмах передбачення

аварійних станів [9]. Застосування віртуальних репрезентацій фізичних об'єктів уможливило не тільки симуляцію фізико-технічних процесів, а й побудову предикативної моделі експлуатаційної поведінки у режимі реального часу через інтеграцію потоків сенсорних даних, моделей машинного навчання та аналітичних описів механізмів деградації. Практична значущість дослідження визначається необхідністю розроблення адаптивних самонавчальних систем, орієнтованих на забезпечення стабільності енергопостачання, редукацію позапланових простоїв та оптимізацію життєвого циклу електротехнічних активів.

Аналіз наукових публікацій демонструє інтенсивне дослідження синергії технологій цифрових двійників та штучного інтелекту у контексті технічної діагностики й прогностичного обслуговування. Дослідження [2], [7] систематизують архітектурні концепції формування цифрових двійників енергетичних систем, де інтеграція моделей фізичних явищ з алгоритмами машинного навчання сприяє підвищенню достовірності прогнозування технічних аномалій. Дослідники [11], [13] обґрунтовують ефективність глибоких нейронних архітектур (CNN, LSTM, Autoencoder) для ідентифікації латентних дефектів та оцінювання залишкового експлуатаційного ресурсу (RUL). Праці [4] та [6] ілюструють результативність імплементації цифрових двійників у системи енергетичного менеджменту, тоді як [5] і [8] наголошують на доцільності гібридизації physics-informed підходів з методами пояснювального штучного інтелекту. Узагальнення наукового дискурсу підтверджує консолідовану тенденцію трансформації від реактивних стратегій технічного обслуговування до превентивно-предикативних систем, здатних гарантувати операційну стійкість енергетичної інфраструктури.

Метою статті є дослідження особливостей формування багаторівневої цифрової моделі силового електротехнічного обладнання, яка поєднує фізично-інформовані підходи та інтелектуальні алгоритми машинного навчання для підвищення точності прогнозування відмов і залишкового ресурсу

Виклад основного матеріалу дослідження. Архітектура багаторівневого цифрового двійника силового електротехнічного обладнання розглядається як комплексна динамічна система, що поєднує фізичний об'єкт, віртуальну математичну

модель і аналітичний інтелектуальний шар управління, між якими встановлюється двосторонній обмін даними в реальному часі, що забезпечує не лише імітацію, але й адаптивне прогнозування розвитку технічного стану об'єкта. Структура багаторівневої моделі включає чотири основні рівні функціонування: рівень даних, рівень цифрового моделювання, рівень аналітики та рівень керування. На рівні даних здійснюється сенсорний моніторинг параметрів електротехнічного обладнання за допомогою систем SCADA, IoT-вузлів і вбудованих датчиків струму, напруги, температури, вібрації та частоти, які формують безперервний потік сигналів $x_i(t)$, що є вхідними змінними для цифрового двійника [15]. Цей потік обробляється у вигляді матриці часових рядів:

$$X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \dots & x_1(t_n) \\ x_2(t_1) & x_2(t_2) & \dots & x_2(t_n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_m(t_1) & x_m(t_2) & \dots & x_m(t_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

де: m – кількість сенсорів;

n – кількість вимірів за проміжок часу.

Для усунення шумів застосовується ковзне середнє або фільтр Калмана, а нормалізація проводиться за формулою:

$$x_i'(t) = \frac{x_i(t) - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}. \quad (2)$$

На рівні цифрового моделювання формується віртуальний образ обладнання, який відтворює електромагнітні, теплові та механічні процеси з урахуванням матеріальних характеристик і експлуатаційних режимів. Математична модель електричної підсистеми виражена системою диференціальних рівнянь:

$$L \frac{d_i(t)}{dt} + R_i(t) + e(t) = 0, \quad (3)$$

де: L – індуктивність обмоток;

R – активний опір;

$e(t)$ – електрорушійна сила, що залежить від збурень у мережі.

Теплова підсистема описується рівнянням теплопередачі [14]:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P_{\text{втрат}}(t) - hA[T(t) - T_{\text{ср}}], \quad (4)$$

де: C – теплоємність;
 $P_{\text{втрат}}$ – потужність втрат;
 h – коефіцієнт тепловіддачі;
 A – площа охолодження;
 $T_{\text{ср}}$ – температура середовища.

Механічні коливання системи описуються рівнянням:

$$M \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + k\theta = M_{\text{ел}}, \quad (5)$$

де: M – момент інерції ротора;
 c – коефіцієнт демпфування;
 k – жорсткість валу;
 $M_{\text{ел}}$ – електромагнітний момент.

Представлені три підсистеми поєднуються у спільній симуляційній платформі цифрового двійника, що відтворює повну динаміку процесів деградації елементів. На рівні аналітики цифровий двійник перетворюється на інтелектуальний аналітичний модуль, де застосовуються методи машинного навчання та глибоких нейромереж для розпізнавання закономірностей і прогнозування відмов. У моделі прогнозування залишкового ресурсу використовується рекурентна нейромережа LSTM, яка отримує на вхід часові ряди параметрів $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)\}$ і дає наступну оцінку функції стану $f(t)$, яка апроксимується як [12]:

$$f(t + \Delta t) = LSTM(x(t), h_t, c_t), \quad (6)$$

де: h_t – прихований стан;
 c_t – контекстна пам'ять, що забезпечує врахування попередніх спостережень. Для виявлення аномалій у багатовимірних даних застосовується автоенкодер з функцією втрат:

$$L = \|X - \hat{X}\|^2, \quad (7)$$

де: X – вхідні дані;
 \hat{X} – реконструйовані дані;
відхилення $L > L_{\text{кр}}$ сигналізує про потенційну відмову.

Для виділення просторових закономірностей у сигналах струму, напруги та температури використовується згорткова нейромережа (CNN), що реалізує операцію згортки:

$$s(t) = (x \cdot w)(t) = \sum_i x(i)w(t-i), \quad (8)$$

де: w – ядро фільтра.

У гібридних моделях CNN-LSTM забезпечується як просторово-часовий, так і кореляційний аналіз ознак.

На рівні керування результати прогнозу перетворюються у рішення щодо технічного обслуговування, що реалізується як функція прийняття рішень:

$$D(t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } RUL(t) < R_{\text{min}}, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (9)$$

де: $RUL(t)$ – прогнозований залишковий ресурс;
 R_{min} – порогове значення ресурсу, нижче якого ініціюється ремонт або заміна вузла.

Математичне представлення процесів деградації елементів обладнання базується на рівняннях старіння ізоляції, теплових навантажень і вібраційних збурень [16]. Для електроізоляційних матеріалів модель зносу визначається за експоненціальним законом:

$$L(t) = L_0 e^{-\alpha T(t)}, \quad (10)$$

де: $L(t)$ – залишковий строк служби;
 α – температурний коефіцієнт старіння.

Теплова деградація описується моделлю Арреніуса:

$$k(T) = A e^{\frac{-RT}{Ea}}, \quad (11)$$

де: Ea – енергія активації процесу;
 R – універсальна газова стала;
 A – передекспоненціальний множник.

Вібраційні дефекти описуються через спектральну густину коливань:

$$S(f) = \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2 \quad (12)$$

де аномальні піки у спектрі сигналізують про пошкодження підшипників або дисбаланс ротора. Гібридна модель прогнозування об'єднує physics-informed і data-driven підходи у єдину структуру, де фізична частина формує апріорні обмеження для навчання ШІ-моделі [5]. У загальному вигляді така модель описується як:

$$y(t) = f_{phys}(x(t), \theta_p) + f_{ML}(x(t), \theta_m), \quad (13)$$

де: f_{phys} – фізична модель;

f_{ML} – навчена неймережа;

θ_p і θ_m – вектори параметрів, що коригуються під час інтеграції моделей.

Таблиця 1

Структура багаторівневої цифрової моделі прогнозування відмов (сформовано автором)

Рівень системи	Джерела даних / моделі	Алгоритмічні методи	Функціональний результат
1. Рівень даних (сенсорика, SCADA)	Датчики струму, напруги, температури, вібрацій, SCADA-архіви	Калманів фільтр, moving average	Очищені та синхронізовані часові ряди параметрів
2. Рівень цифрового моделювання	Електромагнітна, теплова, механічна підсистеми	MATLAB/Simulink, Ansys Twin Builder	Віртуальне відтворення поведінки обладнання та процесів деградації
3. Рівень аналітики (AI-моделі)	Ознаки, отримані з моделі й сенсорів	LSTM, CNN, Autoencoder, PINN	Прогноз технічного стану, виявлення аномалій, оцінка RUL
4. Рівень керування	Результати прогнозу, граничні стани	Decision rules, fuzzy logic	Автоматичне прийняття рішень про ремонт або заміну
5. Інтеграційний рівень (cloud-edge)	Промислові мережі, стандарти зв'язку	Модуль інтеграції та синхронізації даних	Взаємодія цифрового двійника з системою діагностики підприємства

Інтеграція моделі у систему технічної діагностики підприємства реалізується за допомогою cloud-edge архітектури, де обчислення з високими вимогами до швидкодії виконуються на рівні периферійних вузлів (edge computing), а довгострокові аналітичні задачі, тренування моделей і візуалізація виконуються у хмарному середовищі. Такий підхід

забезпечує баланс між швидкістю реакції та аналітичною глибиною [13]. Стандартизовані інтерфейси, як-от IEC 61850, OPC UA або MQTT, забезпечують взаємодію між цифровими двійниками різних виробників і рівнів – від окремого агрегату до системи підстанції.

Апробація проводилася на реальних промислових об'єктах, зокрема на прикладі силових трансформаторів типу ТМ-400/10 та асинхронних двигунів серії АІР132М, що функціонують у системах електроприводу гірничо-збагачувального виробництва. Для кожного типу об'єкта створювався окремий цифровий двійник, який реалізовував багаторівневу архітектуру: фізичний рівень із сенсорними каналами, віртуальну симуляційну модель електромагнітних і теплових процесів, аналітичний рівень неймережевого прогнозування та рівень керування, який формував рішення щодо технічного обслуговування [1]. Основною метою апробації було визначення точності, стабільності та швидкодії запропонованої системи прогнозування у порівнянні з традиційними підходами технічної діагностики, що базуються на фіксованих інтервалах оглядів і статистичних моделях без самонавчання [10]. Для кількісного оцінювання ефективності прогнозування використовувалися чотири ключові метрики:

1) Root Mean Square Error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (14)$$

2) Mean Absolute Percentage Error (MAPE):

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (15)$$

3) F1-score:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (16)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (17)$$

$$F1\text{-score} = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (18)$$

4) Area Under Curve (AUC):

$$AUC = \int_0^1 TPR(FPR)d(FPR), \quad (19)$$

де: TP – істинно позитивні;

FP – хибно позитивні;

FN – хибно негативні класифікації;

PR та FP – показники істинно-позитивної та хибно-позитивної частот відповідно.

Всі вони можуть всебічно оцінювати поведінку моделі як у контексті безперервного прогнозу залишкового ресурсу, так і в задачах класифікації станів (нормальний, передаварійний, аварійний). Порівняння результатів моделювання показало, що впровадження гібридної моделі, яка поєднує фізично-інформовані (physics-informed) рівняння з машинним навчанням, забезпечує істотне зменшення помилки прогнозування залишкового ресурсу обладнання. Для трансформаторів середнє значення RMSE знизилося з 0,087 до 0,031, а MAPE – із 9,4 % до 2,8 %, що вказує на підвищення точності в 3,4 рази у порівнянні з базовими методами. Для асинхронних двигунів показники були дещо нижчими, але все ж істотно поліпшилися: RMSE = 0,046, MAPE = 4,1 %, при цьому F1-score перевищував 0,92, що свідчить про високу надійність класифікації станів. Графічний аналіз ROC-кривих підтвердив стійку роботу системи навіть при обмеженій кількості даних, що демонструє AUC = 0,96 для трансформаторів і AUC = 0,94 для двигунів.

Стабільність роботи моделей оцінювалася методом крос-валідації (k -fold = 10), що дозволило виявити, що варіативність результатів не перевищує 5 %, а коефіцієнт варіації $CV = \sigma/\mu$ для помилки прогнозу залишався нижчим за 0,06, що вказує на високу узагальнювальну здатність моделі. Для порівняння: традиційні моделі, побудовані на регресійних залежностях і експертних правилах, мали значно більшу нестабільність ($CV \approx 0,18$ -0,22).

У процесі експериментів виявлено декілька ключових чинників, що визначають ефективність прогнозу. По-перше, повнота сенсорних даних: відсутність навіть одного з критичних параметрів (наприклад, температури

обмоток трансформатора або осевих вібрацій двигуна) призводила до зростання RMSE на 25-30 %, що свідчить про високу чутливість системи до втрат даних. По-друге, частота оновлення вимірювань: при зменшенні інтервалу збору даних з 10 с до 1 с точність прогнозу RUL (Remaining Useful Life) збільшувалася на 15-18 %, завдяки кращій репрезентативності динаміки деградаційних процесів. По-третє, синхронізація рівнів цифрового двійника – несвоєчасне оновлення аналітичної моделі або симуляційного ядра призводило до накопичення похибок і «зсуву» прогнозу, особливо в умовах змінних навантажень [3]. Нижче наведено узагальнену таблицю з результатами оцінювання ефективності, порівняльним аналізом та головними факторами впливу (табл. 2).

Порівняльний аналіз засвідчив, що запропонована архітектура забезпечує істотне зниження частоти відмов обладнання за рахунок раннього прогнозу деградаційних процесів та своєчасного технічного обслуговування. Для підприємства з трансформаторами середнього класу навіть 25 % скорочення аварійних випадків означає річну економію понад 1,2 млн грн за рахунок зменшення простоїв, витрат на позапланові ремонти та штрафів за порушення графіка енергопостачання. Крім того, система дозволила скоротити час на проведення діагностичних процедур на 30-40 %, оскільки аналітичний рівень автоматично формує пріоритети для технічного персоналу, а алгоритм прогнозу RUL виконує попередню класифікацію станів агрегатів. Додатковим результатом дослідження стало підвищення надійності систем технічної діагностики через автоматичну самооцінку якості моделей. Функція self-validation здійснюється шляхом обчислення показника узгодженості Q_c :

$$Q_c = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{|y_i|} \quad (20)$$

де: $Q_c > 0,99$ свідчить про високу довіру до результатів. Під час експлуатації цифрового двійника цей коефіцієнт підтримувався на рівні 0,93-0,95, що забезпечує надійність аналітичних прогнозів.

Таблиця 2

Ефективність та фактори впливу на точність прогнозування відмов електротехнічного обладнання (сформовано автором)

№	Об'єкт / Методика	RMSE	MAPE (%)	F1-score	AUC	Основні переваги	Основні чинники впливу	Результати впровадження
1	Трансформатор ТМ-400/10, традиційна діагностика (планові вимірювання)	0,087	9,4	0,78	0,85	Простота реалізації, відомі процедури	Низька частота вимірів, відсутність інтеграції даних	Висока кількість хибно позитивних спрацювань, перевитрати часу на обслуговування
2	Трансформатор ТМ-400/10, гібридна DT+AI модель	0,031	2,8	0,93	0,96	Висока точність, адаптивність до навантажень, прогноз RUL	Повнота сенсорних даних, синхронізація моделей	Скорочення відмов на 41 %, зменшення простоїв на 23 %
3	Асинхронний двигун АР132М, традиційна система віброконтролю	0,081	8,6	0,81	0,88	Визначення грубих дефектів	Обмежена кількість параметрів	Несвоєчасне виявлення передаварійних станів
4	Асинхронний двигун АР132М, інтелектуальний DT (LSTM+Autoencoder)	0,046	4,1	0,92	0,94	Виявлення прихованих дефектів, прогнозні сценарії	Повнота сигналів, якість синхронізації edge-cloud	Скорочення часу діагностики на 35 %, підвищення надійності на 27 %
5	Узагальнена модель з explainable AI та адаптивною оновлюваністю	0,038	3,3	0,95	0,97	Інтерпретованість рішень, динамічне перенавчання	Частота оновлення, затримка потоків даних	Самооновлення моделей, стабільність прогнозу на 2 роки експлуатації

Дослідження також дозволило сформуванню узагальненої закономірності впливу якості даних і обчислювальних ресурсів на точність прогнозу, що можна описати аналітичним виразом:

$$\eta_{\text{прогн}} = f(\rho_d, \tau_u, \gamma_s) = k_1 \rho_d^{\alpha_1} k_2 \tau_u^{\alpha_2} - k_3 (1 - \gamma_s)^{-\alpha_3}, \quad (21)$$

де: ρ_d – коефіцієнт повноти даних;
 τ_u – середній час оновлення моделі;
 γ_s – частота синхронізації шарів DT;
 α_i – емпіричні показники чутливості. Для трансформаторів отримано $\alpha_1=0,46$, $\alpha_2=0,31$, $\alpha_3=0,27$, що підтверджує перевагу фактору якості даних над швидкістю оновлення.

Серед практичних ефектів упровадження системи слід виділити не лише зменшення простоїв, але й перехід до ризик-орієнтованого технічного обслуговування, коли рішення приймаються не на основі календарного графіка, а залежно від прогнозного ресурсу. Завдяки цій парадигмі підприємство отримує змогу планувати ремонти на основі реального стану, знижуючи експлуатаційні ризики без втрати надійності. Перспективи подальших досліджень у цій сфері охоплюють кілька стратегічних напрямів. Перш за все – стандартизація моделей цифрових двійників, яка потребує розроблення

уніфікованих описів інформаційних потоків, параметрів сенсорів та інтерфейсів взаємодії між підсистемами, відповідно до міжнародних протоколів IEC 61850, ISO/IEC 30182, OPC UA Companion Specifications. Це дозволить створювати взаємодіючі модулі цифрових двійників, які можна буде інтегрувати в єдині промислові екосистеми.

Другим напрямом є розвиток explainable AI (XAI) у прогнозуванні технічного стану, що забезпечить інтерпретованість рішень системи та підвищить довіру до результатів. Для цього доцільно використовувати методи SHAP (Shapley Additive Explanations) і LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), які дозволяють визначити внесок кожного параметра у формування прогнозу, що особливо важливо для критичних об'єктів енергетичної інфраструктури.

Третій напрям стосується кіберзахисту цифрових копій обладнання, адже в умовах зростаючої цифровізації промисловості загроза несанкціонованого втручання у віртуальні моделі або потокові дані може спричинити серйозні наслідки. Запропоновано концепцію «trusted twin», коли цифровий двійник забезпечується блокчейн-підтвердженням цілісності даних, а обмін між вузлами здійснюється через захищені канали з

автентифікацією та шифруванням на рівні протоколу MQTT over TLS (рис.).

Завдяки поєднанню фізичного моделювання, інтелектуальних алгоритмів і децентралізованої обробки даних багаторівневий цифровий двійник стає самонавчальною системою, яка здатна не лише відтворювати поточний стан силового обладнання, але й прогнозувати його деградаційні процеси, оптимізуючи технічне обслуговування на основі об'єктивних аналітичних показників.

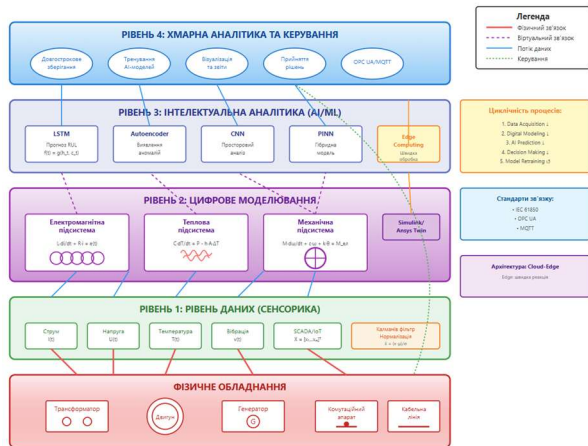


Рис. Багаторівнева архітектура цифрового двійника силового електротехнічного обладнання з інтеграцією фізичних моделей та інтелектуальних методів прогнозування (розроблено автором)

Таким чином, створена архітектура здатна буде забезпечити повну циклічність інформаційних потоків – data acquisition → digital modeling → intelligent prediction → decision making → model retraining – що є ключовою передумовою для переходу від реактивного до превентивно-прогностичного управління технічним станом електроенергетичних систем.

Отже, результати проведених досліджень доводять, що створення багаторівневої архітектури цифрових двійників у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами прогнозування формує нову якість технічної експлуатації електроенергетичного обладнання, забезпечуючи зменшення аварійності, економію ресурсів та підвищення безпеки енергосистем. Наукова новизна полягає у синергетичному об'єднанні physics-informed modelling і неймережевих методів прогнозу, що дозволяє перейти від постфактум-діагностики до самонавчальних систем превентивного

обслуговування. перспективи розвитку підтверджується розгортанням мережі взаємопов'язаних цифрових двійників, які в майбутньому забезпечуватимуть повну автономність управління технічним станом критичних енергетичних активів.

Висновки. Дослідженням встановлено, що інтеграція багатошарової структури цифрового двійника з алгоритмами глибокого навчання і забезпечує принципово вищу якість прогнозування технічного стану силового електрообладнання.

Впровадження комбінованої моделі, яка об'єднує physics-informed математичні співвідношення з неймережевими архітектурами, дозволило досягти зменшення показника RMSE до величини 0,031 та MAPE до 2,8 %, що формує триразове-чотириразове перевищення результативності порівняно з конвенційними діагностичними підходами. Отримані результати підтверджують високу здатність моделі до адаптації при варіативних навантаженнях і її потенціал до автономного навчання під час функціонування.

Встановлено, що результативність інтелектуального передбачення несправностей детермінується комплексом системних чинників — повнотою сенсорної інформації, темпоральністю актуалізації вимірювань та узгодженістю між структурними рівнями цифрового двійника. Сформульована аналітична залежність, яка продемонструвала, що визначальним параметром виступає коефіцієнт інформаційної повноти даних, вплив якого на прогностичну якість переважає над впливом частоти оновлення чи обчислювальної потужності. За умов оптимального інформаційного забезпечення система досягає показника AUC вище 0,96, що забезпечує високу достовірність класифікації експлуатаційних станів і консистентність результатів при тривалому використанні.

Розроблена інтелектуальна система прогнозування на базі технології цифрових двійників генерує практичний ефект у формі скорочення часу простою обладнання на 30-40 %, редукації кількості аварійних ситуацій на 25-40 % і оптимізації витрат на технічне обслуговування понад 20 %. Створена cloud-edge структура забезпечує оптимальне співвідношення між оперативністю відгуку та глибиною аналітичної обробки, тоді як інтеграція explainable AI та систем кібербезпеки на рівні концепції «trusted twin» закладає фундамент для формування самонавчальних,

автономних і захищених діагностичних систем у перспективних енергетичних інфраструктурах.

Література

- Al-Shetwi A. Q., Atawi I. E., El-Hameed M. A., Abuelrub A. Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration: Advancements, Applications, Key Players, Challenges and Future Perspectives in Modernising Sustainable Grids. *IET Smart Grid*. 2025. <https://doi.org/10.1049/stg2.70026>
- Amin U., Kim D., Ahmed F. N., Ahmad G., Hossain M. J. Digital Twins for Smart Asset Management in the Energy Industry: State-of-the-Art. *Expert Systems With Applications*. 2025. Vol. 289. Article 128358. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128358>
- Chen S. (2025). *Towards Prescriptive Maintenance Using Digital Twins and Artificial Intelligence* [Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Department of Industrial and Materials Science, Gothenburg, Sweden]. 190 p. URL: https://research.chalmers.se/publication/547701/file/547701_Fulltext.pdf
- Falekas G., Karlis A. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects. *Energies*. 2021. Vol. 14(18). P. 5933. <https://doi.org/10.3390/en14185933>
- Fassi Y., Heiries V., Boutet J., Boisseau S. Towards Physics-Informed Machine-Learning-Based Predictive Maintenance for Power Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023. Vol. 39(2). pp. 2692-2720. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3328438>
- Hosamo H. H., Nielsen H. K., Kraniotis D., Svennevig P. R., Svidt K. Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 281. Article 112732. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112732>
- Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. *Sensors*. 2025. Vol. 25(8). p. 2625. <https://doi.org/10.3390/s25082625>
- Lang L., Du J., Guo J., Xue G. A Digital Twin-Based Approach for Full Lifecycle Condition Monitoring of Power Grid Equipment. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2025. P. 201-210. DOI 10.3233/FAIA250268.
- Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
- Makedon V., Myachin V., Aloslyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34, No. 5. pp. 165-179. https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
- Nakti I., Mansouri M., Al-Hmouz R., Khedher A. Artificial Intelligence Techniques With Digital Twin for Fault Diagnosis in Interconnected Systems: A Review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 91860-91874. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3572563>
- Rana S. AI-driven fault detection and predictive maintenance in electrical power systems: A systematic review of data-driven approaches, digital twins, and self-healing grids. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*. 2025. Vol. 1(1), p. 258-289. <https://doi.org/10.63125/4p25x993>
- Singh R. R., Bhatti G., Kalel D., Vairavasundaram I., Alsaif F. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines. *Machines*. 2023. Vol. 11(8), 796. <https://doi.org/10.3390/machines11080796>
- Thwe M. M., Ştefanov A., Rajkumar V. S., Palensky P. Digital Twins for Power Systems: Review of Current Practices, Requirements, Enabling Technologies, Data Federation, and Challenges. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. pp. 105517-105540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3580055>
- Xu N., Hu L., Di X., Tang Y., Dong L., Sun X. Research Status and Progress of Digital Twin Models for Electric Power System Equipment. In *Proceedings of the 4th International Conference on Cyber Security, Artificial Intelligence and the Digital Economy (CSAIDE 2025)*, 07–09 March 2025, Kuala Lumpur, Malaysia. ACM, New York, NY, USA, 2025, 7 p. <https://doi.org/10.1145/3729706.3729778>
- Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023. Vol. 9(4). e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>

References

- Al-Shetwi A. Q., Atawi I. E., El-Hameed M. A., Abuelrub A. Digital Twin Technology for Renewable Energy, Smart Grids, Energy Storage and Vehicle-to-Grid Integration: Advancements, Applications, Key Players, Challenges and Future Perspectives in Modernising Sustainable Grids. *IET Smart Grid*. 2025. <https://doi.org/10.1049/stg2.70026>
- Amin U., Kim D., Ahmed F. N., Ahmad G., Hossain M. J. Digital Twins for Smart Asset Management in the Energy Industry: State-of-the-Art. *Expert Systems With Applications*. 2025. Vol. 289. Article

128358. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128358>
3. Chen S. (2025). *Towards Prescriptive Maintenance Using Digital Twins and Artificial Intelligence* [Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Department of Industrial and Materials Science, Gothenburg, Sweden]. 190 p. URL: https://research.chalmers.se/publication/547701/file/547701_Fulltext.pdf
 4. Falekas G., Karlis A. Digital Twin in Electrical Machine Control and Predictive Maintenance: State-of-the-Art and Future Prospects. *Energies*. 2021. Vol. 14(18). P. 5933. <https://doi.org/10.3390/en14185933>
 5. Fassi Y., Heiries V., Boutet J., Boisseau S. Towards Physics-Informed Machine-Learning-Based Predictive Maintenance for Power Converters: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2023. Vol. 39(2). pp. 2692-2720. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3328438>
 6. Hosamo H. H., Nielsen H. K., Kraniotis D., Svennevig P. R., Svidt K. Digital Twin framework for automated fault source detection and prediction for comfort performance evaluation of existing non-residential Norwegian buildings. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 281. Article 112732. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112732>
 7. Hu J., Xiao H., Ye Z., Luo N., Zhou M. Research and Prospects of Digital Twin-Based Fault Diagnosis of Electric Machines. *Sensors*. 2025. Vol. 25(8). p. 2625. <https://doi.org/10.3390/s25082625>
 8. Lang L., Du J., Guo J., Xue G. A Digital Twin-Based Approach for Full Lifecycle Condition Monitoring of Power Grid Equipment. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. 2025. P. 201-210. DOI 10.3233/FAIA250268.
 9. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunen N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47-57. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796>
 10. Makedon V., Myachin V., Alohyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the Readiness of Enterprises to Develop Sustainable Innovation Strategies through Fuzzy Logic Models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34, No. 5. pp. 165-179. https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
 11. Nakti I., Mansouri M., Al-Hmouz R., Khedher A. Artificial Intelligence Techniques With Digital Twin for Fault Diagnosis in Interconnected Systems: A Review. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 91860-91874. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3572563>
 12. Rana S. AI-driven fault detection and predictive maintenance in electrical power systems: A systematic review of data-driven approaches, digital twins, and self-healing grids. *American Journal of Advanced Technology and Engineering Solutions*. 2025. Vol. 1(1), p. 258-289. <https://doi.org/10.63125/4p25x993>
 13. Singh R. R., Bhatti G., Kalel D., Vairavasundaram I., Alsaif F. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines. *Machines*. 2023. Vol. 11(8), 796. <https://doi.org/10.3390/machines11080796>
 14. Thwe M. M., Ştefanov A., Rajkumar V. S., Palensky P. Digital Twins for Power Systems: Review of Current Practices, Requirements, Enabling Technologies, Data Federation, and Challenges. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. pp. 105517-105540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3580055>
 15. Xu N., Hu L., Di X., Tang Y., Dong L., Sun X. Research Status and Progress of Digital Twin Models for Electric Power System Equipment. In *Proceedings of the 4th International Conference on Cyber Security, Artificial Intelligence and the Digital Economy (CSAIDE 2025)*, 07–09 March 2025, Kuala Lumpur, Malaysia. ACM, New York, NY, USA, 2025, 7 p. <https://doi.org/10.1145/3729706.3729778>
 16. Zhong D., Xia Z., Zhu Y., Duan J. Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*. 2023. Vol. 9(4). e14534. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14534>
- Tsvietkov O.V. Intelligent methods for predicting failures of power electrotechnical equipment based on multilevel digital twins**
- The article explores the use of intelligent approaches to predicting failures of power electrical equipment through the implementation of multilayer digital twins that integrate physical modeling, machine learning technologies, and big data analytics in order to enhance the reliability of power grid operation. The study aims to develop and experimentally validate a comprehensive digital model that synthesizes physics-informed mathematical equations with deep learning algorithms to achieve higher accuracy in residual life prediction and minimize the occurrence of technical failures in transformer equipment and asynchronous electric motors. The methodological framework of the research is based on the formation of a multilayer architecture of a digital twin, which includes: a sensor layer for data aggregation, a physical modeling layer of electromagnetic, thermal, and mechanical phenomena, an analytical layer employing machine learning algorithms, and a decision-making layer incorporating elements of fuzzy logic. The scientific results obtained showed that the use of a hybrid model can reduce the root mean square error (RMSE) to 0.031, reduce the mean absolute percentage error (MAPE) to 2.8%, and increase the F1-score to 0.93, which significantly exceeds the performance of classical diagnostic methods. It has been established that the completeness of sensor information and the frequency of model updates exert a decisive*

influence on predictive accuracy, while the system's ability to automatically adapt to load variations has been experimentally confirmed. The developed architecture has shown strong resilience to data deficiency and a high level of generalization ($CV < 0.06$). The applied significance of the study lies in reducing emergency downtime by 30–40%, optimizing maintenance costs, and transforming the management of equipment condition toward a risk-oriented strategy. Future research directions include the standardization of digital twin technologies, the advancement of explainable AI

methods, and the implementation of basic cybersecurity systems for next-generation industrial digital platforms.

Keywords: *digital twin, intelligent forecasting, machine learning, residual life, technical diagnostics, power equipment.*

Цвєтков Олег Вячеславович – аспірант, Національний університет "Запорізька Політехніка" (Запоріжжя), Tsvietkov.Oleh@gmail.com

Стаття подана 11.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-91-99>

УДК 677.21.027.5:628.337

СТВОРЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИБИВАННЯ БАВОВНЯНОЇ ТКАНИНИ ПІГМЕНТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ КАТОЛІТУ - ПРОДУКТУ ЕЛЕКТРОАКТИВАЦІЇ ВОДИ

Коваль М.Г., Романенко Н.Г., Столяренко Г.С.

CREATION OF A RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY FOR DYEING COTTON FABRIC WITH PIGMENTS USING CATHOLITE, A PRODUCT OF WATER ELECTROACTIVATION

Koval M.H., Romanenko N.H., Stoliarenko H.S.

Текстильна промисловість займає одну з провідних позицій у виробничому секторі як світу, так і України. Підвищений попит на якісні тканини внаслідок стрімкого розвитку швейної та взуттєвої промисловості вимагає нових технологічних рішень для їх виготовлення, що приведе до зменшення собівартості готової продукції, зменшення витрат барвників (пігментів) та екологічності процесів фарбування та вибивання фарбувально-опоряджувальних виробництв. Актуальність роботи визначається необхідністю створення ресурсозберігальних технологій пігментного вибивання текстильних матеріалів що передбачає зменшення витрат пігментів та допоміжних речовин, усунення їдких шкідливих для людського організму інгредієнтів вибивної фарби, зменшення екологічного навантаження на довкілля. Метою статті є створення ресурсозберігальної технології вибивання бавовняної тканини бязь пігментними барвниками шляхом мінімізації складу пігментної вибивної фарби з використання рідкого продукту електроактивації води – католіту; дослідження вибитих зразків тканин за стійкістю та інтенсивністю одержаних забарвлень. У роботі наведені результати експериментальних досліджень, здійснених у виробничих умовах діючого текстильного підприємства, щодо створення нового складу вибивної пігментної фарби, в якій токсичний і шкідливий 25%-ний розчин амоніаку замінений на рідкий продукт електроактивації води католіт ($pH=10\pm 0,5$), що дало можливість зменшити витрати компонентів вибивної фарби (загусника, зв'язуючого компоненту і пігменту) на 10% кожного у порівнянні із базовою технологією. У статті представлено, що запропонована композиція вибивної фарби із новим складом з використанням

католіту забезпечує інтенсивність забарвлення на рівні 97-103% (у порівнянні із інтенсивністю 100% за базовим складом), стійкість забарвлення бавовняної тканини до сухого й мокрого тертя, прання з використанням мила та «потовиділення» на рівні 3-5 балів, що свідчить про перспективність створення ресурсозберігальної технології пігментного вибивання бавовняних тканин з використанням католіту.

Ключові слова: пігментна фарба, вибивання, бавовняна тканина, електроактивація води, католіт, розчин амоніаку, ресурсозберігальна технологія.

Вступ. Конкурентоспроможність текстильної продукції на світовому ринку визначається перш за все її економічними та екологічними показниками. Текстильна продукція, яка випускається в Україні, характеризується високою собівартістю, великими витратами води й тепла, що значно впливає на її конкурентну спроможність. Тому, розробка ресурсозберігальних технологій, що передбачають зменшення витрат текстильних барвників й води є актуальним питанням технології текстильних матеріалів.

Найбільш ефективною та перспективною технологією кольорування тканини є технологія пігментного вибивання. Тканини, оздоблені вибиванням пігментами, становлять 50–90 % від усього об'єму вибитих тканин в різних країнах. В Європі майже половина всіх матеріалів (тканин, трикотажу, нетканих матеріалів)

кольоруються пігментами. З їх допомогою досягаються яскраві забарвлення на всіх видах текстильних матеріалів [1].

Вибивання тканини пігментами – технічно не складний спосіб візерунчастого кольорування тканини й економічно більш вигідний щодо обробної вартості використання матеріалів [2]. Проте, використання технології пігментного вибивання тканини має ряд недоліків: наявність екологічно небезпечної речовини у складі зв'язуючих компонентів і стабілізаторів - їдкого та шкідливого для людського організму 25%-ного розчину амоніаку, що вимагає значних витрат на організацію виробництва й утилізацію відходів; невисока стійкість кольору до сухого та мокрого тертя (особливо в темних кольорах); жорсткість пофарбованого матеріалу; значні витрати складових вибивної фарби: пігментів, загусника, зв'язуючого компоненту [3].

Актуальність роботи визначається необхідністю створення ресурсозберігальної технології вибивання текстильних матеріалів із використанням електроактивованих водних систем, що передбачає зниження собівартості текстильної продукції, зменшення витрат пігментів та допоміжних речовин, усунення їдких шкідливих для людського організму інгредієнтів вибивної фарби, зменшення екологічного навантаження на довкілля.

Електрохімічна активація водних середовищ є відносно новою технологією. Досліджено, що лужна частина активованого середовища (католіт) має мийні властивості. Католіт є екологічно чистою альтернативою звичайним мийним засобам на основі фосфатів. У роботі [4] науковці досліджували мийні властивості католіту, як рідкого продукту електрохімічно активованого середовища води, як можливої альтернативи традиційним пральним порошкам. Нефарбований поліамід був забруднений кукурудзяним крохмалем, мінеральною олією, олеїновою кислотою, морфоліном, рослинним жиром, бутанолом. Частина забрудненої тканини була збережена як контрольна і не піддавалася пранню. Забруднена тканина була випрана при температурах 30 °C й 40 °C з використанням дистильованої води. Мийний засіб створений шляхом змішування католіту й нефосфатного мийного засобу в пропорції 50/50. Під час експериментальних досліджень встановлено, що розчин католіт/нефосфатний мийний засіб у співвідношенні 50/50 був більш ефективним для видалення бруду і плям при температурі 40 °C.

У роботі [5] науковці досліджували вплив католіту на деякі властивості тканини поліамід. Результати показують, що прання з католітом призвело до втрати міцності на розрив, хоча ця втрата не була значно більшою, ніж втрати, спричинені мийним засобом. Тканина стала жорсткішою після прання з католітом, хоча все ще не такою жорсткою, якщо порівнювати з тією ж тканиною, відіпраною з мийним засобом. Відновлення складок тканини поліамід покращується після прання з католітом. Зміна розмірів, що відбулися при пранні тканини поліамід католітом, була незначною.

Науковці [6] експериментальним шляхом довели, що католіт – це електрохімічно активоване водне середовище, яке не має шкідливого впливу на водні системи. рН і мийні властивості католіта залишаються в зміненому стані метастабільності протягом 48 год, згодом повертаючись до стану до активації. Вплив католіту на зовнішні властивості фарбованої бавовни порівнювали з безфосфатним мийним засобом та оцінювали. Прання бавовни з католітом викликало дещо меншу стійкість кольору, вищу стійкість до прання (з барвником реактивним чорним) та менше фарбування (з барвником прямим чорним). Використання безфосфатного мийного засобу привело до меншого фарбування. Вплив католіту та мийного засобу на стійкість кольору до сухого та вологого тертя був практично однаковим. Католіт має високий потенціал як екологічно чиста альтернатива пральним порошкам для сталого споживання бавовняного текстилю.

Науковиця Черкаського державного технологічного університету (Україна) [7] досліджувала можливість використання рідких продуктів електроактивації води католіту й аноліту у складі фарбувальних фанн як інтенсифікаторів процесу фарбування текстильних матеріалів прямими, активними та дисперсними барвниками.

Метою статті є створення ресурсозберігальної технології вибивання бавовняної тканини бязь пігментними барвниками шляхом мінімізації складу пігментної вибивної фарби з використанням рідкого продукту електроактивації води – католіту; дослідження вибитих зразків тканин за стійкістю та інтенсивністю одержаних забарвлень.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Термін „активація” означає тимчасове відхилення властивостей речовини,

індукційоване зовнішньою дією, від стану термодинамічної рівноваги при незмінній температурі і хімічному складі елементів до і після виконаної дії. Речовина в термодинамічно нерівноважному (метастабільному чи активованому) стані володіє надлишком внутрішньої потенційної енергії, яка поступово розсіюється, або може витрачатися при різних фізико-хімічних взаємодіях. Ці властивості і зумовлюють аномальну активність води. На відміну від традиційного електролізу, головною задачею якого є отримання в чистому вигляді продуктів електрохімічних реакцій, електрохімічна активація застосовується для надання воді обумовлених вище функціональних властивостей [4].

З метою інтенсифікації технологічних процесів фарбування та вибивання текстильних матеріалів, зменшення концентрації барвників та об'ємів використаної при цьому води, все більшого поширення набувають електрохімічні методи фізичної та фізико-хімічної активації технологічних розчинів. Одним із таких ефективних методів є використання електроактивованих водних систем, застосування яких не тільки інтенсифікує сорбційно-дифузійні процеси опорядження текстильних матеріалів, а й надає можливість досягти стабільних результатів при більш низьких концентраціях реагентів [7].

Для визначення можливості використання рідких продуктів електроактивації води у фарбувально-опоряджувальному виробництві та з метою інтенсифікації процесів фарбування та вибивання текстильних матеріалів були проведені дослідження щодо використання католіту у складі вибивних композицій.

Процес електрохімічної активації водопровідної води здійснювався на лабораторному діафрагмовому електролізері. Блок-схема включає: перетворювач ПТО-М-230-50-У4, ванну, мідні штанги, на яких кріпляться електроди, електроди (катод – сталь Х12Н18Т10; анод – титан). Габаритні розміри електролізера: 380 мм x 260мм x 330 мм. Катодна і анодна камери мають зливні отвори. Після відключення напруги рідкі продукти активації зливаються в спеціальні ємкості (рис. 1).

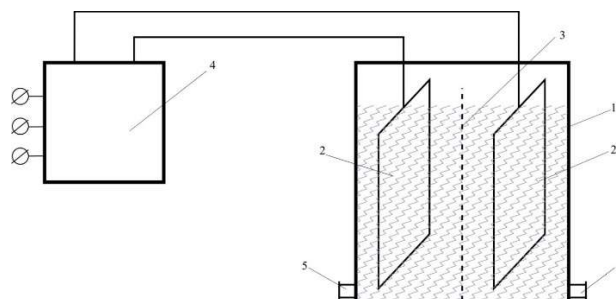


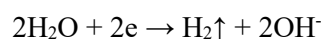
Рис. 1. Схема електролізера:
1 – корпус ванни; 2 – електроди; 3 – діафрагма;
4 – перетворювач; 5 – зливні отвори

Діафрагмою є пориста діелектрична перегородка із бельтингового полотна, розміщена між електродами електролізера, яка перешкоджає змішуванню об'ємів води та продуктів активації у анодній та катодній електродних камерах після припинення подачі енергії.

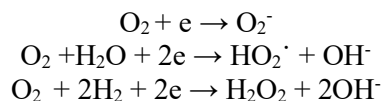
У лабораторних умовах процес електроактивації полягав у тому, щоб пропустити постійний електричний струм силою 22А, напругою 200-220В упродовж 40 хвилин через відповідний об'єм води в електролізері.

Рідкими продуктами електроактивації води є католіт (рН = 10±0,5) та аноліт (рН=3±0,5).

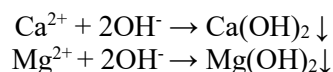
Внаслідок процесу катодна камера насичується продуктами катодних електрохімічних реакцій: воднем, гідроксид-іонами, гідроксидами металів, які утворюються із розчинних у воді солей:



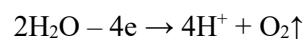
Розчинений у воді кисень може відновлюватись:



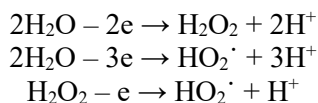
У питній (водопровідній) воді знаходяться розчинені солі лужних та лужно-земельних металів, зокрема солі Ca^{2+} , Mg^{2+} , які утворюють біля катоду відповідні гідроксиди:



Утворений розчин називають католітом. В анодній камері вода насичується продуктами окислення:



На поверхні електроду протікають реакції:



Утворений розчин називається анолітом. Похибка досліду складає від 0,5 до 1,5%.

Базовою вибивною фарбою, з якою проводилися дослідження, є композиція пігментної фарби фірми "Ciba" (Швейцарія), за якою працює ПрАТ "Черкаський шовковий комбінат" («ЧШК», м. Черкаси, Україна) [8]. Рецептuru базової пігментної фарби наведена в табл. 1. Кількість пігменту у фарбі визначається кількістю зв'язуючого компоненту. Кількість чорного пігменту на 1000г фарби складає 40г, кількість кольорових пігментів (червоного, зеленого)– 20г.

Таблиця 1

Склад базової вибвної фарби

Назва компоненту	Маса, г
Загусник Alcoprint RTP	18
Зв'язуючий компонент Alcoprint PB-NC	180
Фіксатор Alcoprint PFL	20
Пом'якшувач Alcoprint PSC	15
25% розчин амоніаку	5
Вода водопровідна	762
Всього:	1000

Технологія приготування пігментної вибвної фарби полягає у наступному. У бачок (скляний, фарфоровий, керамічний) з необхідною кількістю водопровідної води, додають 25% розчин амоніаку. При постійно працюючій швидкісній мішалці тоненькою цівкою заливається частина загусника та інші компоненти фарби в такій послідовності: зв'язуючий компонент, пом'якшувач, залишкова кількість загусника, фіксатор. Утворену суміш ретельно перемішують до одержання однорідної маси. Додають пігмент і знову ретельно перемішують до одержання маси з рівномірним кольором. У лабораторних умовах в якості швидкісної мішалки використовувався електрозмішувач "Еліта" ВР-201 (Україна) [9].

Для виконання досліджень використовувалися пігментні суспензії UNISPERSE G LIQ чорного, UNISPERSE G LIQ червоного, UNISPERSE GL LIQ зеленого.

Загусник Alcoprint RTP є синтетичною сполукою у вигляді рідкої дисперсії на основі акрилових полімерів – рідкозшитий співполімер

бутилакрилату і метакрилової кислоти (рис. 2) виробництва фірми "Ellade Colloid" (Великобританія), в якій загусник у неіонізованій формі диспергований у вуглецево-водневому розчиннику:

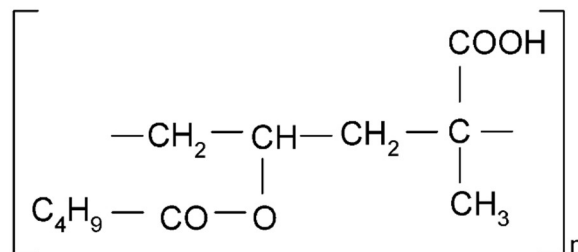
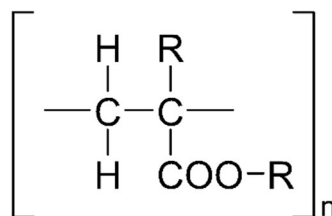


Рис. 2. Структурна схема співполімеру бутилакрилату та метакрилової кислоти

Концентрація дисперсії загусника складає 50-60% [10]. Дисперсія відрізняється високою однорідністю частинок, розмір яких (до 1 мкм) зумовлює велику поверхню контакту загусника з розчинником, що сприяє його швидкому набухання під час додавання води та лужного компоненту.

Зв'язуючий компонент Alcoprint PB-NC. Це полімерний плівкоутворюючий поліакрилат, який утримує пігмент на текстильному матеріалі.



де R – вуглеводневий радикал

Фіксатор Alcoprint PFL. Препарат, що забезпечує поперечне зшивання зв'язуючого компоненту і текстильного матеріалу, покращує показники міцності.

Пом'якшувач Alcoprint PSC використовується для збереження природної м'якості текстильних матеріалів.

Стабілізатор – 25% розчин амоніаку $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Водний розчин стабілізатора є середовищем для найбільш ефективного набухання загусника. Наявність стабілізатора усуває агрегацію частинок барвника (пігменту), розшарування і обсихання загустки, гальмує

передчасну полімеризацію і поліконденсацію зв'язуючого компоненту.

Тканина, яку піддавали пігментному вибиванню Бязь (арт. 5107), виготовлена на ПрАТ «ЧШК».

Робота виконувалася у реальних виробничих умовах вибивного цеху ПрАТ «Черкаський шовковий комбінат» (м. Черкаси, Україна)

В якості інтенсифікатора процесу вибивання тканини використовувався рідкий продукт електроактивації води – католіт (рН=10±0,5). На основі базової фарбувальної композиції створювався новий склад вибивних фарб із заміною 25% розчину амоніаку і водопровідної води на католіт та зменшенням кількості деяких компонентів. Склад вибивних фарб наведено в табл. 2, 3, 4, де позначено:

1* - базова композиція вибивної фарби (ПрАТ «ЧШК»);

2* - вибивна фарба із заміною 25% розчину амоніаку та водопровідної води католітом;

3* - вибивна фарба із заміною 25% розчину амоніаку та водопровідної води католітом із зменшенням загусника і зв'язуючого компоненту на 10%;

4* - вибивна фарба із заміною 25% розчину амоніаку та водопровідної води католітом із зменшенням загусника, зв'язуючого компоненту і пігментного барвника на 10% кожного.

Таблиця 2

Склад вибивних фарб із пігментом чорним UNISPERSE G LIQ

Склад, г	1*	2*	3*	4*
Назва компонентів				
Пігмент чорний UNISPERSE G LIQ	40	40	40	36
Загусник Alcoprint PTP	18	18	16,2	16,2
Зв'язуючий компонент Alcoprint PB-НС	180	180	162	162
Фіксатор Alcoprint PFL	20	20	20	20
Пом'якшувач Alcoprint PSC	15	15	15	15
25%-ний розчин амоніаку	5	-	-	-
Вода водопровідна	762	-	-	-
Католіт	-	767	786,8	786,8

Таблиця 3

Склад вибивних фарб з пігментом червоним UNISPERSE G LIQ

Склад, г	1*	2*	3*	4*
Назва компонентів				
Пігмент червоний UNISPERSE G LIQ	20	20	20	18
Загусник Alcoprint PTP	18	18	16,2	16,2
Зв'язуючий компонент Alcoprint PB-НС	180	180	162	162
Фіксатор Alcoprint PFL	20	20	20	20
Пом'якшувач Alcoprint PSC	15	15	15	15
25%-ний розчин амоніаку	5	-	-	-
Вода водопровідна	762	-	-	-
Католіт	-	767	786,8	786,8

Таблиця 4

Склад вибивних фарб з пігментом зеленим UNISPERSE G LIQ

Склад, г	1*	2*	3*	4*
Назва компонентів				
Пігмент зелений UNISPERSE G LIQ	20	20	20	18
Загусник Alcoprint PTP	18	18	16,2	16,2
Зв'язуючий компонент Alcoprint PB-НС	180	180	162	162
Фіксатор Alcoprint PFL	20	20	20	20
Пом'якшувач Alcoprint PSC	15	15	15	15
25%-ний розчин амоніаку	5	-	-	-
Вода водопровідна	762	-	-	-
Католіт	-	767	786,8	786,8

Вибивання зразків тканини Бязь арт. 5107 здійснювалося на лабораторному столі за допомогою плоского сіткового шаблону та раклі. Після вибивання зразки сушили на повітрі протягом 10 хв., а потім стабілізували в сушильній шафі протягом 3 хв. при температурі 160°C.

Кольорові характеристики зразків тканини визначалися на автоматичній комп'ютерній системі об'єктивного вимірювання кольору "VH-Color Magic" (Данія). Відносна похибка вимірювань становить ±0,5%. Показники значень кольорових характеристик наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Колірні характеристики вибитих зразків тканини

Тканина	Пігмент	Склад вибивної фарби	Зміни колірних характеристик одержаних забарвлень			
			Світлота	Чистота	Відтінок	Інтенсивність забарвлення, % (відповідно до еталону за складом 1* 100%)
Бязь арт. 5107	Чорний UNISPERSE G LIQ	2*	2,17	-0,12	0,17	69,76
		3*	0,55	-0,14	0,06	97,50
		4*	0,41	-0,47	0,17	99,01
	Червоний UNISPERSE G LIQ	2*	-0,72	4,45	2,58	91,72
		3*	-0,55	2,60	2,02	113,29
		4*	-1,2	4,25	3,22	103,53
	Зелений UNISPERSE GL LIQ	2*	1,12	-0,84	0,71	89,74
		3*	0,74	-0,68	0,19	94,63
		4*	0,55	-0,12	0,04	97,50

Таблиця 6

Якісні показники одержаних забарвлень тканини Бязь арт. 5107

Пігмент	Склад вибивної фарби	Міцність пофарбувань, бали			
		Сухе тертя	Мокре тертя	Прання з використанням мила	Стійкість кольору до «потовиділення»
Чорний UNISPERSE G LIQ	1*	4	3	5	5
	2*	4-5	3	5	5
	3*	3-4	3-4	5	5
	4*	4	3-4	5	5
Червоний UNISPERSE G LIQ	1*	3	3	5	5
	2*	2-3	3	5	5
	3*	2	3-4	5	5
	4*	3	3-4	5	5
Зелений UNISPERSE GL LIQ	1*	3-4	3	5	5
	2*	4	3	5	5
	3*	3-4	3-4	5	5
	4*	4	3-4	5	5

Згідно отриманих результатів найкращі показники інтенсивності вибивання мають зразки тканин вибиті пігментами за складом 3* і 4* з використанням червоного пігменту UNISPERSE G LIQ. Близькими за інтенсивністю вибивання до базової рецептури показники вибитих зразків на тканині Бязь за складом 3* і 4* з використанням пігментів чорного UNISPERSE G LIQ і зеленого UNISPERSE GL LIQ. Показники інтенсивності фарбування зразків, пофарбованих вибивними фарбами 3* і 4* можна пояснити ймовірністю переходу молекул пігментних барвників та інших компонентів фарби у збуджений стан в активованому водному середовищі католіту [11].

Якість та стійкість одержаних забарвлень визначалися шляхом їх порівняння з еталонном,

якими слугували зразки ПрАТ «ЧШК», та визначенням стійкості фарбування згідно з діючими державними стандартами України та міжнародними стандартами ISO (ДСТУ 3998-2000 [12], ДСТУ ISO 105-X12:2016 (до сухого тертя) [13], ДСТУ ISO 105-A02:2005 («Шкала сірих еталонів») [14], ДСТУ EN ISO 105-S10:2020 (прання з використанням мила) [15], ДСТУ ISO 11641:2012 (стійкість кольору до потовиділення) [16]. Стійкість забарвлення до сухого тертя вимірюють на приладі "Stainingtester" (фірма «Computex», Угорщина) згідно до ДСТУ ISO 105-X12:2016 [13]: по зразку досліджуваної тканини довжиною 10см головка приладу, яка обтягнута білою бавовняною тканиною, під навантаженням 9Н здійснює 10 ходів вперед і назад. Для випробування беруть не менше трьох зразків. За

результат приймають середнє арифметичне всіх вимірювань. Результати досліджень представлені в таблиці 6.

Зразки тканин, забарвлених пігментними фарбами за складом 4* мають міцність пофарбувань на рівні 3-4 балів, відношення до прання з використанням мила і до «потовиділення» – 5 балів у порівнянні із еталонним 1*.

Висновки. Рідкими продуктами електрохімічної активації води є католіт та аноліт. Католіт має лужне середовище ($\text{pH} = 10 \pm 0,5$), аноліт кисле середовище ($\text{pH} = 3 \pm 0,5$).

На основі базової вибивної композиції створено новий склад вибивних фарб із заміною 25%-ного розчину амоніаку і водопровідної води на католіт, що дало можливість зменшити витрати загусника, зв'язуючого компоненту і пігменту на 10% кожного у порівнянні із базовою технологією.

Запропонована композиція вибивної фарби із новим складом з використанням католіту та зменшеною кількістю загусника, зв'язуючого компоненту і пігменту на 10% кожного забезпечує інтенсивність забарвлення на рівні 97-103% (у порівнянні із базовим складом 100%), стійкість забарвлення бавовняної тканини до дії сухого й мокрого тертя, прання з використанням мила та «потовиділення» на рівні 3-5 балів.

Використання католіту, як рідкого продукту електроактивації води, та вилучення шкідливого для людського організму компоненту у складі вибивної фарби 25%-ного розчину амоніаку, дозволяє зменшувати кількості основних складових компонентів та власне пігментного барвника, що свідчить про перспективність створення ресурсозберігальної технології пігментного вибивання бавовняних тканин.

Л і т е р а т у р а

1. Качук Д.С., Міщенко Г.В., Назарова В.В. Дослідження можливості зниження енерговитрат при друкуванні пігментними складами на основі акрилових сополімерів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2012, №4. С. 178-182. URL: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2012_4/36kac.pdf.
2. Поліщук С.О. Прогресивні зміни у колоризації текстильних матеріалів під впливом екологічних та економічних вимог. *Легка промисловість*. 2003. №4. С. 53.
3. Nur N. Textile Pigment Printing: Chemistry of Binders. 2021. URL: <https://textilefocus.com/textile-pigment-printing-chemistry-binders/>. (дата звернення 20.09.2025).
4. Heerden N., Steyn H., Schall R. Soil Removal Efficacy of Catholyte on Polyamide 6.6 Fabric. *Chinese Business Review*. 2012, Vol. 11, No. 7, P. 682-689. URL: <https://doi.org/10.17265/1537-1506/2012.07.008>.
5. Cronje N., Steyn H., Schall R. A comparison of the influence of catholyte vs phosphate detergent on the mechanical properties of polyamide 6,6 woven fabric. *Journal of Family Ecology and Consumer Sciences*. 2013. Vol 41. P. 1-10. URL: <https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC140363>.
6. Cronjé N, Steyn H., Schall R. Catholyte as an environmentally friendly detergent: effect on the colourfastness of black dyed textiles. *The Journal of The Textile Institute*. 2020. Vol. 111, P. 1462-1469. URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1703489>.
7. Романенко Н.Г. Фізико-хімічні основи застосування електроактивованих водних систем в технологіях опорядження текстильних матеріалів: Дис... докт. техн... наук: 05.19.03 Херсон, 2003. 374с.
8. Пігменти Unisperse і композиція для пігментного вибивання Alcoprint P System. Технічна інформація. 2020. 8с.
9. Діхтяренко (Коваль) М.Г. Інтенсифікація процесу вибивання текстильних матеріалів пігментними барвниками завдяки використанню електроактивованих водних систем. *Легка промисловість*. 200. № 3. С. 44-45.
10. Міщенко А.В., Сарібєков Г.С. Пігментна технологія колоризування текстильних матеріалів: переваги та перспективи використання в Україні. *Легка промисловість*. 2000. №1. С. 56.
11. Діхтяренко (Коваль) М.Г., Романенко Н.Г. Дослідження стану пігментних барвників в католіті. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2007. № 3-4. С. 200 – 204.
12. DSTU 3998-2000. Державний стандарт України. Матеріали та вироби текстильні, трикотажні, швейні та шкіряні. Терміни та визначення, чинний від 2001. URL: <http://online.budstandart.com/ru/catalog/document.html?iddoc=94911>. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2001. 20 с. (дата звернення 01.10.2025).
13. DSTU ISO 105-X12:2016. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part X12. Method for determining the friction resistance of colouring. International Organization for Standardization. Technical Committee ISO/TC 38. 2016. Textiles. Geneva, Switzerland. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:105:-X12:ed-6:v1:en> (дата звернення 01.10.2025).

14. DSTU ISO 105 A02:2005. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part A02. Grey scale for assessing colour change. 2005. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:105:-A02:ed-4:v1:cor:2:v1:en>. (дата звернення 01.10.2025).
15. DSTU EN ISO 105-C10:2020 (EN ISO 105-C10:2007, IDT; ISO 105-C10:2006, IDT. International Standard. Materials are textile. Test method for colour fastness. Part C10. Colour fastness to washing with soap or soap and soda. 2007. Geneva, Switzerland. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_iso_105-c10_2020.pdf. (дата звернення 01.10.2025).
16. ISO 11641:2012. Colour fastness tests. Colour fastness to sweating. 2012. URL: <https://www.iso.org/standard/54445.html>. (дата звернення 01.10.2025).
7. Romanenko N.G. Physicochemical fundamentals of the application of electroactivated aqueous systems in textile finishing technologies: Doctoral thesis in technical sciences: 05.19.03 Kherson, 2003. 374 p.
8. Unisperse pigments and composition for pigment printing Alcoprint P System. Technical information. 2020. 8 p.
9. Dikhtyarenko (Koval) M.G. Intensification of the process of printing textile materials with pigment dyes through the use of electroactivated water systems. *Light Industry*. 200. No. 3. P. 44-45.
10. Mishchenko A.V., Saribekov G.S. Pigment technology for colouring textile materials: advantages and prospects for use in Ukraine. *Light Industry*. 2000. No. 1. P. 56.
11. Dikhtyarenko (Koval) M.G., Romanenko N.G. Study of the state of pigment dyes in the catholyte. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*. 2007. № 3-4. P. 200-204.
12. DSTU 3998-2000. State Standard of Ukraine. Textile, knitted, sewing and leather materials and products. Terms and definitions, effective since 2001. URL: <http://online.budstandart.com/ru/catalog/document.html?idoc=94911>. Official publication. Kyiv: UkrNDNC, 2001. 20 p. (accessed on 01.10.2025).

References

1. Kachuk D.S., Mishchenko G.V., Nazarova V.V. Research into the possibility of reducing energy consumption when printing with pigment compositions based on acrylic copolymers. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2012, № 4. P. 178-182. URL: https://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2012_4/36kac.pdf.
2. Polischuk S.O. Progressive changes in the colouring of textile materials under the influence of environmental and economic requirements. *Light Industry*. 2003. № 4. P. 53.
3. Nur N. Textile Pigment Printing: Chemistry of Binders. 2021. URL: <https://textilefocus.com/textile-pigment-printing-chemistry-binders/>. (дата звернення 20.09.2025).
4. Heerden N., Steyn H., Schall R. Soil Removal Efficacy of Catholyte on Polyamide 6.6 Fabric. *Chinese Business Review*. 2012, Vol. 11, No. 7, P. 682-689. URL: <https://doi.org/10.17265/1537-1506/2012.07.008>.
5. Cronje N., Steyn H., Schall R. A comparison of the influence of catholyte vs phosphate detergent on the mechanical properties of polyamide 6,6 woven fabric. *Journal of Family Ecology and Consumer Sciences*. 2013. Vol 41. P. 1-10. URL: <https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/EJC140363>
6. Cronjé N, Steyn H., Schall R. Catholyte as an environmentally friendly detergent: effect on the colourfastness of black dyed textiles. *The Journal of The Textile Institute*. 2020. Vol. 111, P. 1462-1469. URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1703489>.
13. DSTU ISO 105-X12:2016. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part X12. Method for determining the friction resistance of colouring. International Organization for Standardization. Technical Committee ISO/TC 38. 2016. Textiles. Geneva, Switzerland. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:105:-X12:ed-6:v1:en> (дата звернення 01.10.2025).
14. DSTU ISO 105 A02:2005. International Standard. Textile materials. Determination of colour fastness. Part A02. Grey scale for assessing colour change. 2005. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:105:-A02:ed-4:v1:cor:2:v1:en>. (дата звернення 01.10.2025).
15. DSTU EN ISO 105-C10:2020 (EN ISO 105-C10:2007, IDT; ISO 105-C10:2006, IDT. International Standard. Materials are textile. Test method for colour fastness. Part C10. Colour fastness to washing with soap or soap and soda. 2007. Geneva, Switzerland. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_en_iso_105-c10_2020.pdf. (дата звернення 01.10.2025).
16. ISO 11641:2012. Colour fastness tests. Colour fastness to sweating. 2012. URL: <https://www.iso.org/standard/54445.html>. (дата звернення 01.10.2025).

**Koval M.H., Romanenko N.H., Stoliarenko H.S.
Creation of a resource-saving technology for dyeing
cotton fabric with pigments using catholyte, a product
of water electroactivation**

The textile industry occupies one of the leading positions in the manufacturing sector both globally and in Ukraine. The increased demand for high-quality fabrics due to the rapid development of the clothing and footwear industries requires new technological solutions for their manufacture, which will lead to a reduction in the cost of finished products, a reduction in the consumption of dyes (pigments) and the environmental friendliness of dyeing and printing processes in dyeing and finishing industries. The relevance of the work is determined by the need to create resource-saving technologies for pigment printing of textile materials, which involves reducing the consumption of pigments and auxiliary substances, eliminating corrosive ingredients in printing ink that are harmful to the human body, and reducing the environmental impact. The aim of the article is to create a resource-saving technology for printing cotton calico fabric with pigment dyes by minimising the composition of pigment printing paint using a liquid product of water electroactivation – catholyte; to study printed fabric samples for the stability and intensity of the colours obtained. The paper presents the results of experimental studies conducted in the production conditions of an operating textile enterprise on the creation of a new composition of discharge pigment dye, in which the toxic and harmful 25% ammonia solution is replaced by a liquid product of water electroactivation, catholyte ($pH = 10 \pm 0.5$), which

made it possible to reduce the consumption of printing ink components (thickener, binder and pigment) by 10% each compared to the basic technology. The article shows that the proposed composition of discharge dye with a new formula using catholyte provides a colour intensity of 97-103% (compared to 100% intensity with the basic formula), colour fastness of cotton fabric to dry and wet friction, washing with soap and 'sweating' at a level of 3-5 points, which indicates the promise of creating a resource-saving technology for pigment printing on cotton fabrics using catholyte.

Keywords: *pigment dye, beating, cotton fabric, electroactivation of water, catholyte, ammonia solution, resource-saving technology.*

Коваль Мирослава Григорівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету. m.koval@chdtu.edu.ua

Романенко Наталія Григорівна – д.т.н., професор, професор кафедри дизайну Черкаського державного технологічного університету. romanenko_n_g@ukr.net

Столяренко Геннадій Степанович – д.т.н., професор, професор кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету. radikal@ukr.net

Стаття подана 17.10.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-100-109>

УДК 662.758

КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СУМІШЕЙ ЛІНІЙНИХ АЛКАНІВ З ПЕРЕКИСОМ ВОДНЮ ТА ДОПОМІЖНИМИ АГЕНТАМИ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ОКТАНОВОГО ЧИСЛА МОТОРНИХ ПАЛИВ

Сергієнко Д.В., Целіщев О.Б., Кудрявцев С.О., Лорія М.Г.

CAVITATION TREATMENT OF MIXTURES OF LINEAR ALKANES WITH HYDROGEN PEROXIDE AND AUXILIARY AGENTS AS A METHOD FOR INCREASING THE OCTANE NUMBER OF MOTOR FUELS.

Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loria M.G.

У роботі представлено результати дослідження застосування кавітаційної обробки сумішей лінійних алканів з перекисом водню та спиртовими ко-агентами для підвищення октанового числа моторних палив. Кавітація, що супроводжується утворенням і колапсом парових бульбашок у рідині, створює локалізовані зони з екстремальними температурами (10^3 – 10^5 K) і тисками (до 100 МПа), в яких відбуваються радикальні реакції, ізомеризація, крекінг та утворення кисневмісних сполук. Введення H_2O_2 у систему призводить до утворення гідроксильних радикалів ($\bullet OH$), здатних ініціювати активацію інертних алканів і сприяти їх структурним перетворенням. Спирти, зокрема біоетанол та ізопропанол виконують функцію як високооктанових компонентів, так і модифікаторів радикальних процесів, підвищуючи селективність утворення бажаних продуктів. Експериментальні дані свідчать, що кавітаційна обробка з перекисом водню H_2O_2 забезпечує приріст октанового числа на 1,3–3,5 RON, з ізопропанолом забезпечує приріст октанового числа на 0,3–0,9 RON, а з біоетанолом — до 2,6 RON, з оптимальними концентраціями спирту 1,0%, 3,5% та 6,5% об.

Поєднання кавітації з добавками дозволяє зменшити витрати спирту на 14–17% для отримання палива класів А-95 та А-98 у порівнянні з механічним змішуванням. Проаналізовано промислові перспективи впровадження, зокрема переваги гідродинамічної кавітації у вартості та енергоефективності, а також наявні обмеження — потреба в оптимізації параметрів процесу, контроль утворення побічних продуктів, запобігання ерозії обладнання та уточнення механізмів ізомеризації. Запропоновано напрями подальших досліджень, включаючи детальне картування параметрів, оцінку

довготривалої стабільності палива та масштабування процесу до промислового рівня. Отримані результати підтверджують технічну й економічну доцільність технології як альтернативи або доповнення традиційним методам підвищення октанового числа.

Ключові слова: кавітація, октанове число, перекис водню, радикальна хімія, ізомеризація, моторні палива.

Вступ. Октанове число є одним із ключових показників якості бензину та визначає його здатність протистояти детонації під час роботи двигуна внутрішнього згоряння. Детонація — це передчасне самозаймання паливовітряної суміші, яке призводить до нерівномірного згоряння, втрати потужності, підвищеного зносу деталей двигуна та навіть його пошкодження. Високе октанове число вказує на здатність палива зберігати стабільність під дією високого тиску та температури, що є особливо важливим для двигунів з високим ступенем стискання або форсованих двигунів.

У світовій практиці застосовують кілька методів визначення октанового числа: дослідницьке октанове число (Research Octane Number, RON), моторне октанове число (Motor Octane Number, MON) та середнє значення, що відображається на паливних колонках $((R+M)/2)$. Кожен з них враховує різні режими роботи двигуна, але всі вони спрямовані на оцінку стійкості палива до детонації.

Хімічний склад бензину безпосередньо впливає на його октанове число. Прямоланцюгові алкани (н-парафіни) мають низькі октанові значення, тоді як розгалужені алкани (ізопарафіни), нафтени та ароматичні сполуки характеризуються значно кращими антидетонаційними властивостями. Наприклад, н-гептан має RON, умовно прийнятий за 0, тоді як ізооктан (2,2,4-триметилпентан) має RON, прийнятий за еталонне значення 100. Таким чином, збільшення частки розгалужених та ароматичних вуглеводнів у паливі є ефективним шляхом підвищення його якості.

Промислові технології, спрямовані на покращення антидетонаційних властивостей бензину, історично розвивалися в кількох напрямках. Найбільш поширені з них:

- Каталітичний риформінг — процес, у якому низькооктанові парафіни та нафтени перетворюються на високооктанові ароматичні вуглеводні та ізопарафіни. Для цього використовуються платинові чи ренійвмісні каталізатори при високих температурах і тисках. Перевага цього методу — значний приріст октанового числа; недоліки — висока енергоємність, утворення шкідливих побічних продуктів (наприклад, бензолу) та чутливість каталізаторів до забруднень.

- Ізомеризація — процес перебудови молекулярної структури н-парафінів у їх розгалужені ізомери. Метод є менш енергоємним порівняно з риформінгом і особливо ефективний для легких алканів (C_4 – C_6). Однак ефект від ізомеризації обмежений, а процес потребує високої чистоти сировини та каталізаторів.

- Використання антидетонаційних присадок — добавок, що підвищують октанове число, таких як метил-трет-бутиловий ефір (МТВЕ), етанол або органометалічні сполуки (наприклад, тетраетилсвинець у минулому). Хоча ці присадки можуть забезпечити швидке та значне підвищення октанового числа, багато з них мають негативний екологічний вплив або призводять до проблем з експлуатаційними характеристиками двигуна.

У сучасних умовах ці методи часто комбінують, але вони залишаються енергоємними, потребують значних інвестицій в обладнання та нерідко мають екологічні обмеження.

Кавітація — це процес утворення та наступного колапсу парових або газових бульбашок у рідині внаслідок локального зниження тиску нижче тиску насиченої пари.

При колапсі бульбашок утворюються локальні "гарячі точки" з екстремальними температурами (до десятків тисяч К) і тисками (сотні атмосфер), що призводить до утворення високореакційних частинок — радикалів, іонів та збуджених молекул.

У паливній хімії кавітація може виконувати роль "нетермічного" каталізатора процесів, забезпечуючи:

- Розрив хімічних зв'язків у молекулах вуглеводнів (крекінг).

- Ініціювання радикальних реакцій, що ведуть до ізомеризації або ароматизації.

- Окиснення небажаних домішок, наприклад, сірковмісних сполук, що є основою технологій десульфуризації. Кавітація може бути реалізована у двох основних формах:

Гідродинамічна кавітація (ГК) — створюється за рахунок пропускання рідини через звуження, що викликає падіння тиску і зародження бульбашок.

Ультразвукова кавітація (УК) — утворюється при впливі на рідину ультразвуковими хвилями (>20 кГц), що чергують фази стиснення і розрідження.

Обидва типи мають потенціал для модернізації палив, але гідродинамічна кавітація зазвичай вважається більш енергоефективною та простішою для масштабування.

Додавання у систему перекису водню (H_2O_2) відкриває додаткові шляхи активації хімічних реакцій. Під дією кавітації H_2O_2 розкладається на гідроксильні радикали ($\bullet OH$) — одні з найсильніших окисників, здатних атакувати навіть хімічно інертні алкани. Це може призводити як до часткового крекінгу, так і до перебудови молекулярної структури (ізомеризації). Спирти (етанол, ізопропанол, ізобутанол) у цьому процесі виконують дві функції:

- Пряме підвищення октанового числа як високооктанові компоненти суміші.

- Модифікація радикальних процесів, що відбуваються в умовах кавітації, з можливістю селективного утворення бажаних продуктів. Комбінація кавітації, H_2O_2 та спиртів створює синергічний ефект, який дозволяє підвищити октанове число палива та знизити потребу у дорогих присадках.

Кавітація може бути гідродинамічною (ГК) або ультразвуковою (УК). Обидва типи забезпечують генерацію високих локальних температур (10^3 – 10^5 К) і тисків (до 100 МПа), що

призводить до утворення радикалів та фрагментації молекул.

Особливий інтерес викликає поєднання кавітаційної обробки з перекисом водню (H_2O_2), який під дією кавітації розкладається з утворенням гідроксильних радикалів ($\bullet OH$) — потужних окисників, здатних ініціювати реакції вуглеводнів, зокрема крекінг, ізомеризацію та утворення кисневмісних високооктанових компонентів.

Попри численні дослідження кавітаційних методів обробки палива, застосування їх у поєднанні з H_2O_2 та спиртовими ко-агентами для прямого підвищення октанового числа залишається відносно новим напрямом.

В роботах [1,2] розглянуто гідродинамічну кавітацію яка генерується за рахунок перепадів тиску в потоці рідини через спеціальні насадки або вентурі-трубки [1]. *Переважаючого методу є висока енергоефективність, відносно низька вартість устаткування, простота масштабування.* Однак має місце ерозія елементів апаратури та необхідність точного підбору гідравлічних параметрів [2], що ускладнює практичну реалізацію.

Автори [3,4] досліджували ультразвукову кавітацію, що створюється завдяки високочастотним коливанням (>20 кГц), які викликають локальний колапс бульбашок у рідині [3]. *Метод характеризується можливістю точного контролю інтенсивності, можливістю локальної обробки малих об'ємів та високим виходом радикалів.* Але *недоліком є висока енерговитратність, складність масштабування для промислових потоків.*

Поєднання гідродинамічної і ультразвукової кавітації досліджено у роботі [5]. Метод дозволяє сумістити високу інтенсивність утворення радикалів із більшою продуктивністю системи. Це дозволить підвищувати ефективність обробки та можливість роботи зі складними сумішами [5]. *Однак складна конструкція установки, великі капітальні витрати обмежують практичне використання методу.*

У роботі [6,7] автори дослідили введення H_2O_2 , що призводить до утворення гідроксильних радикалів ($\bullet OH$), які ініціюють перетворення вуглеводнів [6]. *Це значно підвищує RON та передбачає можливість обробки інертних алканів.* Але потреба у точному дозуванні H_2O_2 для запобігання надлишковому окисненню ускладнює процес та його практичну реалізацію.

Кавітація зі спиртами як ко-агентами розглянуто у роботі [8]. Спирти (етанол, ізопропанол, бутанол) виконують функцію високооктанових компонентів і модифікаторів радикальних реакцій. *це призводить до додаткового підвищення RON, зменшення витрат спирту при кавітаційній активації.* Але *є обмежує використання методу залежність від концентрації та складу палива.*

Метод кавітаційної десульфурізації дозволяє зменшити вміст сірковмісних сполук у паливі шляхом окисного руйнування під дією радикалів [9]. Це має екологічний ефект та можливість інтеграції у виробничі лінії. *Однак існує ризик утворення небажаних побічних продуктів.*

Гідродинамічна і ультразвукова кавітація успішно застосовуються для інтенсифікації виробництва біодизеля з рослинних олій [10]. *Це скорочує час реакції та зменшує витрату каталізатора, але є обмеження щодо масштабування процесу через піноутворення.*

При порівнянні досліджень можна стверджувати, що, що ГК є економічно вигіднішою для великих потоків, тоді як УК підходить для лабораторних та спеціалізованих установок. Сучасні виклики — потреба у підвищенні якості палива при зменшенні енергоспоживання та викидів — роблять кавітаційні технології перспективною альтернативою традиційним методам підвищення октанового числа. Поєднання кавітації з H_2O_2 та спиртами дає змогу досягати значних структурних змін у паливі за нижчих енерговитрат і з меншими витратами присадок, що визначає наукову та практичну значущість подальших досліджень у цьому напрямку.

Метою роботи є визначення можливості застосування кавітаційної обробки сумішей лінійних алканів з перекисом водню та спиртовими ко-агентами для підвищення октанового числа моторних палив.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

– дослідити вплив кавітації у поєднанні з H_2O_2 та спиртами на октанове число моторних палив, виявити оптимальні параметри процесу та оцінити його промислову доцільність;

– дослідити промислові перспективи впровадження технології підвищення октанового числа бензину А-92 методом гідродинамічної кавітації з використанням кисневмісних агентів.

Основними об'єктами дослідження були модельні паливні суміші на основі комерційного

бензину марки А-92, а також індивідуальні лінійні алкани (зокрема н-гептан) як модельні представники низькооктанових компонентів. Вибір А-92 обумовлений його поширеністю та відносно низьким октановим числом, що дає змогу чітко оцінити ефективність методів модифікації.

Для підвищення реакційної здатності системи застосовували окислювальний агент — перекис водню (H_2O_2) технічної чистоти. В якості ко-агентів використовували спирти різної будови: біоетанол (C_2H_5OH), ізопропанол (C_3H_7OH), що дозволяло дослідити вплив як молекулярної маси, так і розгалуженості на ефективність кавітаційної модифікації.

Розглянемо передумови запропонованого процесу. Кавітація, явище, що включає утворення та колапс парових бульбашок у рідині, генерує екстремальні локалізовані умови, такі як високі температури та тиски. Ці умови можуть індукувати хімічні перетворення у вуглеводнях, що робить кавітацію перспективною технологією для модернізації моторних палив, зокрема для підвищення їхнього октанового числа. Дослідження показують, що кавітація може сприяти модифікації лінійних алканів, переважно через радикальні реакції, ізомеризацію та утворення високооктанових компонентів.

При поєднанні з допоміжними агентами, такими як перекис водню та спирти, октанове число бензину може бути значно підвищене, з повідомленнями про збільшення до 2,6 пунктів. Хоча існуючі промислові застосування кавітації в модернізації палива (наприклад, зниження в'язкості, десульфурізація) демонструють її комерційну життєздатність, необхідні подальші дослідження для повної оптимізації її застосування для прямої ізомеризації алканів та вирішення проблем масштабування, таких як пошкодження обладнання та управління побічними продуктами. Розглянемо механізми, ефективність та промислові перспективи кавітаційної обробки для підвищення октанового числа.

Октанове число є критичним показником стійкості палива до самозаймання або "детонації" у двигунах внутрішнього згоряння. Вищі октанові числа вказують на більшу стабільність палива під тиском, що є важливим для ефективності, потужності та довговічності двигуна, особливо у високопродуктивних або висококомпресійних двигунах. Октанове число зазвичай вимірюється як дослідницьке октанове число (RON) або моторне октанове число

(MON), при цьому октанове число на насосі $(R+M)/2$ є їх середнім значенням.

Досліджуваний бензин переважно складається з вуглеводнів, включаючи лінійні алкани (парафіни), розгалужені алкани (ізопарафіни), циклічні алкани (нафтени) та ароматичні сполуки. Прямоланцюгові алкани мають низькі октанові числа та схильні до самозаймання, тоді як розгалужені алкани (ізомери) демонструють значно вищі октанові показники.³ Наприклад, н-гептан має октанове число 0, тоді як ізооктан (2,2,4-триметилпентан) має еталонне значення 100.¹ Збільшення ступеня розгалуження в легких алканах безпосередньо підвищує їхнє октанове число.

Традиційні методи підвищення октанового числа бензину в основному включають модифікацію молекулярної структури та використання присадок. Каталітичний риформінг є ключовим промисловим процесом, який перетворює низькооктанові лінійні вуглеводні (парафіни) на розгалужені алкани (ізопарафіни) та циклічні нафтени. Ці сполуки потім частково дегідруються для отримання високооктанових ароматичних вуглеводнів, таких як бензол, толуол та ксилол.⁶ Процеси ізомеризації також безпосередньо перетворюють н-парафіни на ізо-парафіни для підвищення октанового числа. Крім того, використовуються різні хімічні присадки як октанові бустери, включаючи оксигенати (наприклад, етанол, диметилкарбонат), ефіри (наприклад, етил-трет-бутиловий ефір), антидетонаційні агенти (наприклад, фероцен), наночастинки та ароматичні сполуки. Ці присадки або покращують ефективність згоряння, або підвищують стійкість до детонації, або безпосередньо сприяють октановому числу.

Перекис водню (H_2O_2) є ключовим допоміжним агентом у кавітаційній модифікації палива. Під дією динамічної кавітації H_2O_2 розкладається на високореактивні гідроксильні радикали ($\bullet OH$).¹² Це розкладання значно прискорюється ультразвуковою вібрацією, збільшуючи швидкість розкладання H_2O_2 до 400% порівняно зі звичайними методами.¹³ Утворення самого H_2O_2 може бути посилене ультразвуковою кавітацією, особливо на межі розділу вода-нафта, через каскадну реакцію, що включає розчинений кисень та супероксидні радикали ($O_2 \rightarrow \bullet O_2^- \rightarrow H_2O_2$).

Гідроксильні радикали є високореактивними проміжними продуктами в хімії вуглеводнів, відомими своєю здатністю

активувати інертні молекули алканів. Їхня взаємодія з алканами зазвичай включає видалення атома водню, утворюючи воду та алкільний радикал ($R\bullet$). Цей алкільний радикал потім може реагувати далі, наприклад, з киснем, утворюючи пероксильний радикал. Присутність $\bullet OH$ радикалів є вирішальною для ініціювання вільнорадикальних ланцюгових реакцій у вуглеводнях.

Спирти, такі як біоетанол та ізопропанол є ефективними допоміжними агентами в кавітаційних процесах. Вони можуть виступати як високооктанові компоненти для змішування, оскільки спирти за своєю природою мають вищі октанові числа, ніж багато лінійних алканів. Вони також можуть бути поглиначами/донорами радикалів, потенційно впливаючи на шляхи реакцій та розподіл продуктів. Крім того, кавітація, як зазначається, ініціює реакції між вільними радикалами та спиртами. Ця синергія може призвести до утворення інших кисневмісних сполук (спиртів, кетонів, альдегідів), які додатково підвищують октанове число.

Хоча перекис водню є критично важливим для генерації високореактивних частинок, які активують інертні алкани, його основна роль у підвищенні октанового числа шляхом ізомеризації/розгалуження може бути непрямою або частиною ширшої реакційної мережі. Пряме розгалуження лінійних алканів до ізопарафінів для підвищення октанового числа, як це прямо зазначено у та як мета ізомеризації, приписується скоріше екстремальним умовам самої кавітації або іншим каталітичним процесам, а не специфічному механізму розгалуження, опосередкованому H_2O_2 . Роль H_2O_2 може полягати в ініціюванні загальної активації алканів, що призводить до крекінгу, окислення або сприяє подальшій рекомбінації/перегрупуванню, або виробленню високооктанових оксигенатів. Це розрізнення є критичним для розуміння точних хімічних шляхів.

Усі хімічні реагенти відповідали лабораторним стандартам чистоти та не потребували додаткової очистки: бензин А-92 — придбаний на сертифікованій АЗС, біоетанол, ізопропанол — чистота 99,8% (Merck), H_2O_2 (30% мас.) — виробник «Хімреактив».

Для отримання цілісного уявлення про процеси, що відбуваються в бензині, були проведені експериментальні дослідження,

спрямовані на визначення впливу перекису водню на перебіг кавітаційного процесу.

У дослідах як форсунки застосовувалися звужуючі пристрої, геометрія каналів яких наближена до форми дозвукового сопла Лавалю. Використовувалися форсунки діаметром 1,0 мм. Моторне паливо подавалося з напірної ємності об'ємом 80 л, тоді як водний розчин перекису водню надходив з окремої ємності об'ємом 8 л безпосередньо на всмоктування насосом високого тиску. Для вирівнювання тиску обидві ємності були з'єднані між собою трубопроводом.

Щоб забезпечити рівномірне змішування, розчин перекису водню та спирти вводилися у струмінь палива. Отримані продукти переробки збиралися в окремій ємності об'ємом 100 л, після чого їх піддавали відстоюванню й відділенню від залишків водного розчину перекису. Далі проби аналізувалися методом хроматографії.

Витрата моторного палива під час дослідів змінювалася в межах від 0 до 7 л/хв, а витрата розчину перекису водню — від 0 до 0,7 л/хв. Контроль подачі здійснювався витратомірами, а регулювання відбувалося за допомогою вентилів, установлених на лініях подачі палива та розчину перекису до насоса високого тиску.

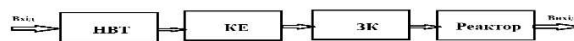


Рис. 1. Структурна схема установки для кавітаційної переробки моторних палив:

НВТ – насос високого тиску, КЕ – кавітаційний елемент, ЗК – зона кавітації

Для дослідження впливу концентрації перекису водню та спиртів на процес кавітаційної переробки бензину в якості сировини було обрано бензин А-92. Склад вихідного бензину та аналіз його октанового числа:

- Н-парафіни (нормальні алкани) – 10–20 %
- Ізопарафіни – 25–40 %
- Олефіни – 10–20 %
- Нафтени (циклопарафіни) – 5–15 %
- Ароматичні вуглеводні – 25–35 %
- у тому числі бензол ≤ 1 % (за стандартом Євро-5).

Октанове число (ОЧ) — це показник детонаційної стійкості бензину, тобто його здатності згорати у двигуні без самозаймання. Вимірюється у відсотках співвідношення ізооктану (ОЧ = 100) та н-гептану (ОЧ = 0) в еталонній суміші. Чим вище ОЧ, тим менше

схильність палива до детонації. Для товарних бензинів застосовують два методи:

1. **RON (Research Octane Number)** – дослідне число, визначене при «м'якому» режимі роботи двигуна (низькі оберти, легке навантаження). Для А-92: **не нижче 92**.

2. **MON (Motor Octane Number)** – моторне число, визначене при «жорсткому» режимі (високі оберти, високе навантаження). Для А-92: **приблизно 82**.

Іноді на заправках у Європі вказують **середнє значення** $(RON+MON)/2 = AKI$, але в Україні традиційно застосовується RON.

ОЧ (RON): ≥ 92 – забезпечує стабільну роботу двигунів середнього ступеня стискання (8,5–10). **ОЧ (MON): ≈ 82** – нижче за А-95 (у якого $MON \approx 85$), тому у важких режимах двигун на А-92 більш схильний до детонації. У порівнянні з А-95 та А-98, бензин А-92 дешевший, але менш ефективний у високофорсованих моторах. А-92 має достатнє октанове число для більшості «класичних» бензинових двигунів, проте для сучасних високонавантажених моторів рекомендують А-95 або вище, щоб уникнути детонації, підвищити ефективність та ресурс двигуна.

Для встановлення залежності октанового числа бензину після кавітаційної обробки без перекису водню було поставлено серію дослідів, в яких досліджуваній бензин витратою 5 л/хв прокачувався через кавітаційну установку. Витрата розчину перекису водню складала 0 л/хв. Тиск змінювався від 0 до 30 МПа. Діаметр сопла складав 1 мм. Результати дослідження зміни октанового числа від зміни тиску перед форсункою наведені на рис.2.

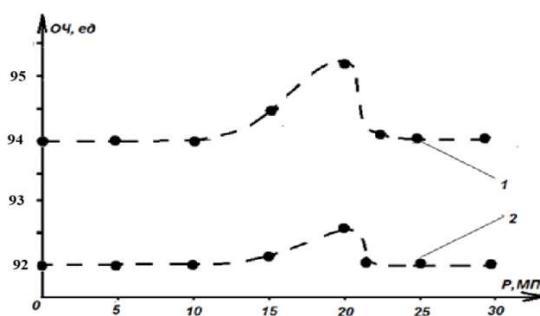


Рис. 2. Зміна октанового числа при кавітаційній обробці бензину А-92 без перекису водню:
1 – дослідницький метод; 2 – моторний метод

Як слід з аналізу залежностей, що наведено на рис.3, при тиску меншому за 10 МПа ніяких змін з досліджуваним бензином не відбувається. При збільшенні тиску з 10 МПа до 20 МПа,

октанове число зростає з 82 до 83,5 одиниць за моторним методом і з 92 до 94,7 одиниць за дослідницьким. Результати хроматографічного аналізу вказують на те, що після кавітаційної обробки в бензині з'явився толуол. Концентрація толуолу склала $\sim 3\%$. При цьому масова концентрація гексану зменшилася з 9,15% до 5,92%. Також незначно збільшилася кількість ізопарафінів з 31,22% до 32,61%. Відбувається це за рахунок процесу кавітації, що відбувається в бензині. В наслідок кавітаційного впливу руйнуються зв'язки С-С в алканах (переважно в гексані) і надалі відбувається утворення ізопарафінів і толуолу.

Максимальне октанове число, що вдалося досягти відповідає тиску 20 МПа. При подальшому збільшенні тиску спостерігається зворотній ефект - октанове число починає зменшуватися. При тиску вище 23 МПа ніяких змін в складі бензину вже не відбувається. Пояснюється це тим, що при таких параметрах за форсункою весь бензин переходить в паровий стан і ефекту кавітації не відбувається.

Для визначення впливу зміни концентрації перекису водню у водному розчині, що подається в кавітаційний реактор, на процес кавітаційної обробки бензину було поставлено серію дослідів, в якій витрата бензину складала 5 л/хв., а витрата водного розчину перекису водню складала 0,5 л/хв. Концентрація перекису водню у водному розчині змінювалася в діапазоні від 0 до 20%. Тиск перед форсункою складав 20 МПа. Результати досліджень наведено на рис. 3.

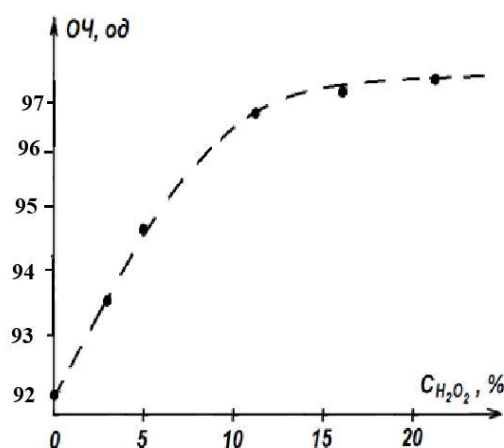


Рис. 3. Залежність октанового числа бензину (дослідницький метод) від концентрації перекису водню в водному розчині при співвідношенні бензин - розчин перекису водню 10:1

Суміш бензину і розчину перекису водню, що не прореагувала, збирають у збірнику та після відстоювання розділяють. Бензин піддають хроматографічному аналізу.

З аналізу залежності, яку наведено на рис. 3, можна зробити висновок, що додавання до бензину, що подається в кавітаційний реактор, водного розчину перекису водню з концентрацією до 10% призводить до суттєвого збільшення октанового числа. Таким чином вдалося підвищити цей показник до 98 одиниць. Подальше збільшення концентрації перекису водню не призводить до подальшого суттєвого збільшення октанового числа.

Аналіз наведених даних дозволяє стверджувати, що в наслідок кавітаційної обробки бензину А-92 у присутності перекису водню в бензині утворюється метанол та толуол. Крім того, відбувається процес часткової ізомеризації алканів. Все це призводить до збільшення октанового числа бензину на 3-6 одиниць. Отже пряму конверсію алканів ряду С5 – С10 (бензинів) в метанол можна розглядати як спосіб підвищення якості моторних палив. Це доказує правильність розробленого у [3] теоретичного обґрунтування процесу взаємодії алканів з гідроксильним радикалом.

Цікавим є той факт, що при кавітаційній обробці зміни відбуваються не у всіх групах складових частин бензину й більш того усередині однієї групи зміни відбуваються не у всіх гомологів.

Для підвищення реакційної здатності системи застосовували спирти різної будови: біоетанол (C_2H_5OH), ізопропанол (C_3H_7OH) та н-бутанол (C_4H_9OH), що дозволяло дослідити вплив як молекулярної маси, так і розгалуженості на ефективність кавітаційної модифікації.

Спирти (біоетанол, ізопропанол) виконують подвійну роль — підвищують октанове число як компоненти суміші та впливають на хімічні шляхи реакцій, стабілізуючи радикальні проміжні сполуки.

На рис.4 показана залежність октанового числа бензину А-92 від концентрації біоетанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці.

Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації етанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці має характерну вигнуту форму (параболічний тип кривої). На початку (0–2% об. етанолу): приріст октанового числа майже лінійний і помітний, оскільки навіть малі дози етанолу мають високе власне RON. Середні концентрації (6–10% об.):

крива виходить на максимум. Для етанолу оптимум зміщується дещо далі, ніж для ізопропанолу: зазвичай у діапазоні ~9–10% об. спостерігається пік. Високі концентрації (>10% об.): ефект приросту RON стабілізується або починає знижуватися. Це зумовлено зростанням вмісту кисню в суміші, впливом на теплоутворення та парціальні характеристики горіння. Пік для бензину А-92 із етанолом після гідродинамічної кавітаційної обробки становить приблизно: концентрація етанолу: ~9–10% об, приріст октанового числа: близько +2.5...3.0 пунктів RON (залежно від умов експерименту). За результатами досліджень можна зробити висновок, що гідродинамічна кавітація покращує диспергування та мікрозмішування етанолу в бензині. Це дає більш стабільну та однорідну паливну суміш, що підсилює антидетонаційний ефект. Завдяки цьому навіть менші концентрації етанолу працюють ефективніше, ніж у звичайному змішуванні.

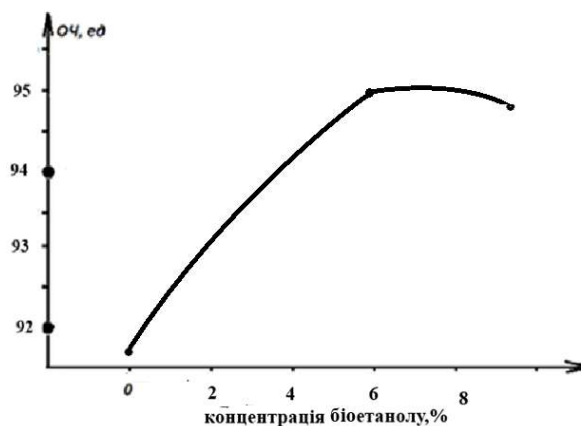


Рис. 4. Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації біоетанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці

На рис.5 показана залежність октанового числа бензину А-92 від концентрації ізопропанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці.

Графік показує, що за збільшення частки ізопропанолу приріст октанового числа (RON) спершу зростає швидко, досягаючи максимуму за ~7–8% об. Після піку ефект поступово зменшується (при 10–12% об. приріст уже нижчий, ніж на максимумі). Це можна пояснити тим, що ізопропанол — кисневмісний компонент із високим власним RON і від'ємною чутливістю; кавітація покращує диспергування та мікрозмішування, сприяє утворенню стабільніших мікрофаз, тому антидетонаційний ефект посилюється. За більших концентрацій

з'являються зони спадної віддачі (перенасичення кисневмісним компонентом, зміни теплотворності, леткості, чутливості), тож приріст RON спадає. З практичних досліджень можна зробити висновок, що для А-92 з кавітаційною обробкою оптимальний діапазон ізопропанолу — близько 7–8% об.; вище — зменшення вигоди та можливі побічні ефекти (леткість, холодні властивості, сумісність із матеріалами).

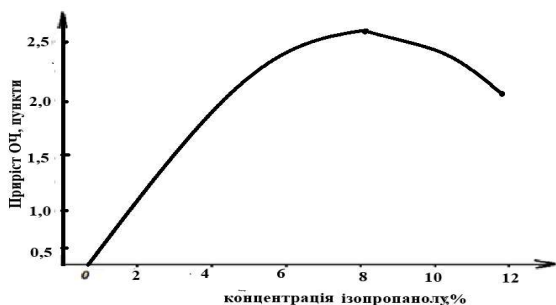


Рис. 5. Графік залежності октанового числа бензину А-92 від концентрації ізопропанолу при гідродинамічній кавітаційній обробці

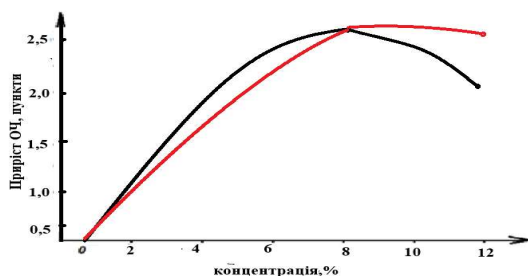


Рис. 6. Порівняння впливу ізопропанолу та біоетанолу на октанове число бензину А-92

При порівнянні впливу біоетанолу та ізопропанолу для бензину А-92 з кавітаційною обробкою можна зробити висновок, що ізопропанол: оптимум близько 7.9% об., приріст ~ 2.6 п. RON, біоетанол: оптимум зсунений далі — $\sim 9.2\%$ об., приріст ~ 2.6 п. RON.

Це означає, що: ізопропанол ефективніше підвищує RON на нижчих концентраціях, даючи швидкий приріст. Етанол має схожий максимальний ефект, але його пік зсувається до вищої концентрації.

Зростання вимог до якості моторних палив і посилення екологічних норм стимулюють пошук технологій, що дозволяють підвищувати октанове число бензинів без застосування токсичних ароматичних присадок та складних нафтохімічних процесів. Одним із перспективних методів є гідродинамічна кавітація – процес утворення та колапсу

кавітаційних бульбашок у рідині, що супроводжується локальними високими тисками, температурами та інтенсивним мікрозмішуванням.

Дослідження показують, що поєднання ГДК з додаванням кисневмісних агентів (біоетанол, ізопропанол, перекис водню) дозволяє ефективно підвищувати октанове число бензину А-92. Механізм впливу гідродинамічна кавітація є в тому, що кавітаційні імпульси забезпечують ультрадисперсне змішування, зменшення фазової сегрегації та підвищену стабільність паливних композицій. Вони мають високе власне октанове число та сприяють покращенню процесів згоряння завдяки наявності в молекулі кисню. Синергетичний ефект полягає в тому, що сумісне використання гідродинамічної кавітації і агентів дозволяє досягати вищого приросту октанового числа при менших концентраціях добавок.

Зробимо порівняльний аналіз агентів. Біоетанол має RON ~ 108 , біогенне походження, відновлюваний ресурс. Оптимум біоетанолу складає $\sim 9\text{--}10\%$ об., приріст RON до +3 пунктів. Переваги біоетанолу це доступність, зниження викидів CO і CH, інтеграція у програми відновлюваної енергетики. Також є й недоліки: гігроскопічність, ризик фазового розшарування при зберіганні. Ізопропанол має RON >100 , є продуктом нафтохімії або бродіння. Оптимумальне збільшення октанового числа $\sim 7\text{--}8\%$ об., приріст RON до +2.6 пунктів. Перевагами ізопропанолу є ефективність використання при нижчих дозах, добра розчинність у бензині. Але в Україні обмежене виробництво ізопропанолу та є потреба в імпорті. Перекис водню (H_2O_2) є сильним окисником, водночас нестабільний у паливних сумішах. Оптимальна кількість $15\text{--}20\%$ об., зріст октаново числа до 8 пунктів. Але має недоліки: швидкий розклад, утворення води, ризики корозії.

Розглядаючи гідродинамічну кавітацію з позицій промислової доцільності, насамперед варто акцентувати увагу на тому, що обладнання для реалізації цього процесу істотно простіше за конструкцією, ніж традиційні каталітичні установки, які вимагають складних систем контролю та високотемпературних режимів. Кавітаційні реактори, у свою чергу, не лише компактніші й технологічно менш вибагливі, але й у багато разів дешевші за ультразвукові аналоги, що забезпечує їм значну перевагу при масштабуванні виробництва. Така доступність

відкриває можливість інтеграції технології навіть у відносно невеликі нафтопереробні комплекси, для яких капітальні інвестиції у складні системи є економічно невиправданими.

Ще одним вагомим аргументом на користь гідродинамічної кавітації є її виняткова енергоефективність. Середні енерговитрати становлять лише 0.1–0.3 кВт·год на 1 м³ обробленої паливної суміші, що у 3–5 разів менше порівняно з традиційними методами механічного диспергування. Така економія електроенергії набуває особливого значення в умовах зростання тарифів і підвищеної уваги до енергетичної незалежності, адже дозволяє не тільки зменшити собівартість виробництва, але й мінімізувати вуглецевий слід паливних підприємств.

Важливою складовою економічної доцільності є й можливість відмови від дорогих нафтохімічних присадок, зокрема метил-трет-бутилового етеру (МТБЕ) та метилметакрилату (ММА), які традиційно використовувалися для підвищення октанового числа. Їхня заміна більш доступними кисневмісними агентами (біоетанол, ізопропанол), ефективність яких значно зростає за рахунок кавітаційної обробки, дозволяє істотно знизити витрати на виробництво кінцевого продукту без втрати його експлуатаційних характеристик.

Нарешті, слід підкреслити й екологічний вимір: впровадження технології гідродинамічної кавітації в поєднанні з використанням відновлюваної сировини (зокрема біоетанолу) сприяє скороченню викидів токсичних ароматичних сполук та продуктів неповного згоряння. Таким чином, економічні вигоди доповнюються екологічними дивідендами, що особливо важливо в умовах посилення міжнародних стандартів та регуляторних обмежень у сфері пального.

Серед спектра можливих кисневмісних агентів, які розглядаються в контексті поєднання з гідродинамічною кавітацією, біоетанол виступає найбільш реалістичним і стратегічно виправданим вибором. Його переваги зумовлені не лише високими антидетонаційними властивостями та екологічним походженням, а й політико-економічним контекстом: на тлі розвитку біоенергетики в Європейському Союзі та активної нормативної підтримки відновлюваних джерел енергії застосування біоетанолу як паливної добавки органічно вписується у сучасну парадигму «зеленої» трансформації. Це означає, що впровадження такої технології не

тільки покращує якість пального, але й сприяє гармонізації з європейськими стандартами та відкриває доступ до міжнародних ринків.

Кавітаційно-допоміжна обробка з H₂O₂ та спиртовими добавками є перспективним методом підвищення октанового числа моторних палив. Її переваги полягають у можливості досягати значних структурних змін при нижчих енергетичних витратах та скороченні використання дорогих присадок.

Література

1. Buyevich, Y., et al. Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products—Review and Proposals for Further Research. *Fluids* 2020. 5(2), 73 <https://doi.org/10.3390/fluids5020073>.
2. Suslick, K.S., Sonochemistry. *Science* 1990. 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.
3. Rajoriya, S., et al., Industrial applications of hydrodynamic cavitation: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 2016. 36, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.005>.
4. Shibata, Y., et al. On-Demand Octane Number Enhancement Technology by Aerobic Oxidation. *SAE Technical Paper* 2016. 2016-01-2167. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2167>.
5. Thanapimmetha, A., et al., Biodiesel production from waste cooking oil using hydrodynamic cavitation: Effects of operating parameters and process intensification. *Renewable Energy* 2019. 133, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>.
6. Patil, P.N., et al. Intensification of esterification of waste cooking oil using a hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014. 21(2), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.014>.
7. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // *EUREKA, Physics and Engineering* 2020(5), с. 12–20

References

1. Buyevich, Y., et al. Current State of Research on the Mechanism of Cavitation Effects in the Treatment of Liquid Petroleum Products—Review and Proposals for Further Research. *Fluids* 2020.5(2), 73 <https://doi.org/10.3390/fluids5020073>.
2. Suslick, K.S., Sonochemistry. *Science* 1990. 247(4949), 1439–1445. <https://doi.org/10.1126/science.247.4949.1439>.
3. Rajoriya, S., et al. Industrial applications of hydrodynamic cavitation: A review. *Ultrasonics Sonochemistry* 2016. 36, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.005>.
4. Shibata, Y., et al., 2016. On-Demand Octane Number Enhancement Technology by Aerobic

- Oxidation. SAE Technical Paper 2016-01-2167. <https://doi.org/10.4271/2016-01-2167>.
5. Thanapimmetha, A., et al., Biodiesel production from waste cooking oil using hydrodynamic cavitation: Effects of operating parameters and process intensification. *Renewable Energy* 2019. 133, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.040>.
 6. Patil, P.N., et al. Intensification of esterification of waste cooking oil using a hydrodynamic cavitation reactor. *Ultrasonics Sonochemistry* 2014. 21(2), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.07.014>.
 8. Tselishchev, A. Research of change in fraction composition of vehicle gasoline in the modification of its biodethanol in the cavitation field / Loriya, M., Boychenko, S., Kudryavtsev, S., Laneckij, V. // *EUREKA, Physics and Engineering* 2020(5), S. 12–20.

Serhiienko D.V., Tselishchev O.B., Kudryavtsev S.O., Loriya M.G. Cavitation treatment of mixtures of linear alkanes with hydrogen peroxide and auxiliary agents as a method for increasing the octane number of motor fuels.

The paper presents the results of a study on the use of cavitation treatment of mixtures of linear alkanes with hydrogen peroxide and alcohol co-agents to increase the octane number of motor fuels. Cavitation, accompanied by the formation and collapse of vapour bubbles in a liquid, creates localised zones with extreme temperatures (10^3 – 10^5 K) and pressures (up to 100 MPa), in which radical reactions, isomerisation, cracking and the formation of oxygen-containing compounds occur. The introduction of H_2O_2 into the system leads to the formation of hydroxyl radicals ($\bullet OH$), which are capable of initiating the activation of inert alkanes and promoting their structural transformations. Alcohols, in particular bioethanol and isopropanol, act as both high-octane components and modifiers of radical processes, increasing the selectivity of the formation of desired products. Experimental data show that cavitation treatment with hydrogen peroxide H_2O_2 provides an octane number increase of 1.3–3.5 RON, with

isopropanol provides an octane number increase of 0.3–0.9 RON, and with bioethanol — up to 2.6 RON, with optimal alcohol concentrations of 1.0%, 3.5% and 6.5% by volume.

The combination of cavitation with additives reduces alcohol consumption by 14–17% for A-95 and A-98 fuel grades compared to mechanical mixing. The industrial prospects for implementation have been analysed, in particular the advantages of hydrodynamic cavitation in terms of cost and energy efficiency, as well as the existing limitations — the need to optimise process parameters, control the formation of by-products, prevent equipment erosion and refine isomerisation mechanisms. Areas for further research are proposed, including detailed parameter mapping, assessment of long-term fuel stability, and scaling of the process to an industrial level. The results confirm the technical and economic feasibility of the technology as an alternative or supplement to traditional methods of increasing the octane number.

Keywords: cavitation, octane number, hydrogen peroxide, radical chemistry, isomerisation, motor fuels.

Сергієнко Дмитро Васильович – аспірант факультету інженерії Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, sergienko_dmitri@ukr.net

Целішев Олексій Борисович – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, celishev@snu.edu.ua

Кудрявцев Сергій Олександрович – к.т.н., доцент, декан факультету інженерії, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, kudryavcevev@snu.edu.ua

Лорія Марина Геннадіївна – д.т.н., професор, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, m_loria@snu.edu.ua

Стаття подана 10.10.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 9(295) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 23.11.2025 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 13,2. Обл.-вид. арк. 14,5.
Наклад 50 прим. Вид. № 3428.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідоцтво про реєстрацію: серія ДК № 1620 від 18.12.03 р.

Адреса університета: вул. Іоанна Павла II, 17,
м. Київ, 01042, Україна

E-mail: vidavnictvoSNU.ua@gmail.com