

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ



В І С Н И К

**Східноукраїнського
національного університету
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**№ 12 (298)
2025**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Київ 2025

ВІСНИК

СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

№ 12 (298) 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

№ 12 (298) 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.

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 № 5 від 23 грудня 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 A.V.INTEGRATED DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR ADAPTIVE DIAGNOSTICS
OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS..... 5**Доля О.Є., Доля Е.К.**МОДЕЛІ КОМАНДНОЇ РОБОТИ В ІТ-ПРОЕКТАХ ТА ЇХ ВПЛИВ
НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... 19**Могильний Г.А., Смагіна О.О., Донченко В.Ю., Швець І.М., Донченко С.М., Чамара Д.І.**СИСТЕМНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОС UBUNTU ДЛЯ СТВОРЕННЯ
НАВЧАЛЬНИХ СТЕНДІВ RASPBERRY PI..... 28**Яцький О.В., Борю С.Ю.**ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ
ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ 38

Спеціальність 132

Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Лукашенко В.А., Гардер Д.А.,**Соколовський М.В., Бернацький А.В.**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ
СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ AISI 304..... 47

Спеціальність 133

Подригало М.А., Краснокутський В.М.ВПЛИВ ПРИЧІПНИХ ЛАНОК НА СТІЙКІСТЬ РУХУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА
З ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЮ РАМОЮ 56**Фесенко Г.В., Мелконов Г.Л., Боровік П.В.**

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТУКОВОЇ МАШИНИ З ВІДЦЕНТРОВАНИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ 61

Спеціальність 151

Davidenko N.O., Karpiuk L.V., Kobzarev Ye.V.

ANALYSING THE FEATURES OF CAD APPLICATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS..... 67

Спеціальність 161

Пітак Я.М., Балаєв А.Д.ПРО БУДОВУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ $CaO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ 72

Спеціальність 273

Доля К.В.ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНОВО-ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З УРАХУВАННЯМ РИЗИКУ ВІДМОВ 79**Кузишин А.Я.**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНОЇ
РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦІ 88

CONTENTS

Speciality 122

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V. INTEGRATED DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR ADAPTIVE DIAGNOSTICS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS.....	5
Dolia O.E., Dolia E.K. TEAMWORK MODELS IN IT PROJECTS AND THEIR IMPACT ON SOFTWARE DEVELOPMENT EFFICIENCY	19
Mohylnyi H.A., Smahina O.O., Donchenko V.U., Shvets I.M., Donchenko S.M., Chamara D.I. UBUNTU SYSTEM SOFTWARE FOR CREATING RASPBERRY PI EDUCATIONAL STANDS.....	28
Yatskyi O.V., Boriu S.Y. APPLICATION OF LARGE LANGUAGE MODELS FOR DETECTING SOFTWARE CODE VULNERABILITIES	38

Speciality 132

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Lukashenko V.A., Harder D.A., Sokolovskyi M.V., Bernatskyi A.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER WELDING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE OF BUTT WELDED JOINTS OF AISI 304 STAINLESS STEEL	47
--	----

Speciality 133

Podrigalo M.A., Krasnokutskyi V.M. THE INFLUENCE OF TRAILER COUPLINGS ON THE STABILITY OF WHEELED TRACTORS WITH ARTICULATED FRAMES	56
Fesenko H.V., Melkonov H.L., Borovik P.V. INCREASING THE EFFICIENCY OF A FAT MACHINE WITH CENTRIFUGAL WORKING BODIES	61

Speciality 151

Davidenko N.O., Karpiuk L.V., Kobzarev Ye.V. ANALYSING THE FEATURES OF CAD APPLICATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS.....	67
--	----

Speciality 1651

Pitak Ya.M., Balaev A.D. ABOUT THE STRUCTURE OF A MULTICOMPONENT SYSTEM $\text{CAO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$	72
--	----

Speciality 273

Dolia K.V. OPTIMIZATION OF PLANNED AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF ROLLING STOCK TAKING INTO ACCOUNT THE RISK OF FAILURES	79
Kuzyshyn A. Ya. STUDY OF THE TEMPERATURE OPERATING REGIME OF A PNEUMATIC SUSPENSION SPRING OF HIGH-SPEED RAILWAY ROLLING STOCK.....	88

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-5-18>

UDC 004.03

INTEGRATED DIGITAL TWIN FRAMEWORK FOR ADAPTIVE DIAGNOSTICS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Vychuzhanin V.V., Vychuzhanin A.V.

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Вичужанін В.В., Вичужанін О.В.

This paper presents a comprehensive methodological framework for creating an integrated information environment for the monitoring, diagnostics, and prognostics of the technical condition of complex technical systems (CTS), exemplified by ship power plants. The relevance of the work is driven by the necessity of transitioning from fragmented and static analytical methods to dynamic, real-time lifecycle management systems for equipment. The primary focus is placed on the synthesis of classical approaches, such as probabilistic graphs and fault trees, with modern technologies including digital twins (DT), big data streaming analytics, and the "Model-as-a-Service" (MaaS) paradigm. The scientific novelty of the research lies in the development of an adaptive architecture where the traditional static fault tree is transformed into a dynamic ontological structure. A mathematical risk calculation model based on the Min Cut Upper Bound approximation is introduced, ensuring computational efficiency during the processing of high-intensity telemetry streams via Kafka and Flink. The paper describes an original Error Classifier architecture that functions as a semantic validator. The implementation of a "veto" mechanism, based on the physical constraints of the digital twin, reduced the diagnostic model's false-positive rate by 20%, ensuring the priority of physical consistency over statistical correlations. The practical significance of the research is confirmed by simulation results of various engine component degradation scenarios. Experimental data demonstrate that integrating prognostic models into the digital twin loop provides a systemic advantage: classification accuracy increases from 0.87 to 0.94, and the forecast update delay is reduced by more than half, from 5.0 to 2.1 seconds. A methodology for model lifecycle management is proposed through a closed-loop MLOps cycle, including physics-informed training, shadow

deployment, and automated characteristic drift detection. The work formalizes a residual useful life (RUL) calculation algorithm based on a dynamic probability gradient, allowing the system to adapt to changes in operational intensity in real time. The resulting multilevel information environment architecture—comprising Data, Preprocessing, Diagnostics, Prognostics, and Decision Support layers—represents a complete methodological solution for proactive maintenance and the transition toward autonomous CTS monitoring systems.

Keywords: Digital Twin; complex technical systems; streaming analytics; adaptive diagnostics; fault tree; residual useful life prediction; MLOps

Introduction. The rapid development of Industry 4.0 technologies has significantly changed approaches to monitoring, diagnosing and predicting the condition of CTS, which are characterised by high dimensionality, non-linear interactions and operational uncertainty [1, 2, 3]. One of the key concepts enabling the transition from traditional planned maintenance to intelligent lifecycle management is DT technology, which provides an integrated virtual-physical foundation for adaptive diagnostics.

Recent studies emphasize that DTs provide a foundation for integrating physical processes, sensor-based monitoring data, and intelligent decision-making algorithms. In particular, Fuller et al. [4] describe the digital twin as a set of enabling technologies that ensure continuous interaction between a physical asset and its virtual representation. However, they highlight major open

challenges related to scalability, adaptability, and data quality under real operational conditions. From a modeling perspective, Rasheed et al. [5] analyze DTs as computational frameworks supporting system-level diagnostics and decision-making. The authors stress the importance of combining physics-based models with machine learning methods, while identifying unresolved issues associated with uncertainty quantification and robustness under stochastic disturbances. In the context of industrial deployment, DTs play an increasingly important role in maintenance and repair strategies. Errandonea et al. [6] provide a systematic review of DT applications in maintenance, emphasizing that most existing implementations remain largely descriptive and insufficiently developed in terms of prognostic capabilities and residual useful life estimation. A concise but conceptually significant perspective on the evolution of the digital twin paradigm is presented by Tao and Qi [7], who argue that DTs must evolve from isolated models toward more comprehensive autonomous systems capable of self-diagnosis and self-learning. One of the most actively developing areas is the use of DTs for predictive maintenance (PdM). In their systematic review, Abd Wahab et al. [8] demonstrate that integrating PdM with DT technologies can significantly improve fault management efficiency. Nevertheless, important limitations remain, including the lack of unified architectural standards and insufficient interpretability of intelligent diagnostic models. Particular attention has been given to the application of digital twins for fault diagnosis in electrical machines and drive systems. Hu et al. [9] highlight the strong potential of DT-based approaches for fault diagnosis, but note that many existing models lack adaptability to changing operating conditions and do not provide robust real-time performance. Similarly, Hedayati Kia et al. [10] investigate real-time digital twins for intelligent condition monitoring, identifying unresolved problems related to computational complexity and the need for low-latency processing of high-frequency streaming sensor data. Recent research also emphasizes the necessity of integrating digital twins with artificial intelligence. The review by Ma et al. [11] shows that AI-guided predictive maintenance based on digital twins is a promising direction, but it requires further development of validation procedures, interpretability mechanisms, and lifecycle governance of diagnostic models. In addition, the systematic review by Ismail et al. [12] underlines that DT-driven predictive maintenance requires a unified taxonomy of architectural elements and

standardized approaches to integrating data, models, and decision-support services. Furthermore, Hu [13] provides a state-of-the-art overview of enabling technologies and applications of digital twins, emphasizing that one of the key remaining challenges is the development of resilient diagnostic structures capable of operating under uncertainty and incomplete data.

Thus, despite significant progress in the development of digital twin technologies, analysis of research reveals a number of unresolved issues: the lack of universal digital twin architectures that integrate real-time diagnostics and forecasting; insufficient adaptability of DT models to changing operating conditions and noisy sensor measurements; limited integration of artificial intelligence methods with physically based diagnostic mechanisms; the need to standardise predictive maintenance systems and the lifecycle management of constantly evolving diagnostic models.

The aim of this article is to develop an integrated DT architecture for adaptive fault diagnosis and prediction of CTSs, providing intelligent support for predictive maintenance in conditions of uncertainty and streaming operational data.

Results. The methodological framework widely used for diagnosing CTSs traditionally relies on three directions: defect detection, performance verification, and technical state prognostics. Solving these tasks requires the presence of diagnostic indicators with specified values, as well as formal methods for their processing (sequential or combinational). At the same time, the formation of logical hypotheses based on the analysis of the nature of fault manifestations and their subsequent verification constitute the foundation of classical diagnostic practice.

A distinctive feature of CTS is the presence of numerous interrelated parameters that vary according to probabilistic laws. In this regard, the most effective methods are those that take uncertainties into account. Currently, two main approaches are known:

- stochastic, based on the probabilistic space of random events. Its advantage lies in its applicability with minimal a priori information about the structure and behavior of the object. Its disadvantage is the need for large amounts of data, which are difficult to obtain under abnormal operating conditions;
- fuzzy, based on the theory of fuzzy sets. Its advantage is the possibility of using subjective expert assessments; its drawback is the focus on

specific classes of objects and limited universality [14].

Despite the existence of methods for accounting for uncertainties, their common drawback remains the insufficient completeness of defect descriptions that occur during operation and the inability to construct diagnostic models (DM) that adequately reflect real fault scenarios. In addition, the application of these approaches requires significant time, measurement resources, and high personnel qualifications.

In this regard, the relevance of creating an information environment for monitoring and diagnostics increases - one that provides assessment of the CTS state with predefined probabilistic characteristics. Such an environment should integrate both classical diagnostic methods and modern information technologies: streaming analytics, digital twin platforms, cognitive modeling, and remote monitoring tools. This combination makes it possible to move from fragmented diagnostic analysis to end-to-end information support of the complex system's life cycle.

Of particular importance is the use of international standards. For example, the ISO standards [15] provide the methodological basis for developing open monitoring and diagnostic platforms, ensuring solution compatibility and scalability.

The methodological support for organizing remote monitoring and diagnostics of CTS state, using ship power plant (SPP) as an example, can be based on the generalized algorithm shown in Fig. 1. It reflects the key tasks: forming an adequate diagnostic model, determining the set of diagnostic features and their ranking, establishing conditions of operability and defect indicators, building algorithms, and developing programs for defect detection and state change forecasting.

A classical tool for the methodological support of diagnostics of CTSs is the *fault tree*, which allows formalizing the interrelation of object elements and possible paths of their degradation. Figure 2 presents the structure of the fault tree of the main engine (ME), constructed based on the principles of block-modular hierarchy, adaptation, and informational unity. In traditional studies, the fault tree was used as a static model reflecting the interconnections of elements at different levels. However, under the conditions of a DT, it acquires a dynamic function: the nodes of the tree are synchronized with sensor data streams as well as with risk assessment models. Thus, the failure or degradation of a specific element is recorded not

only as a hypothetical scenario but also as an event confirmed by telemetry and model prediction. A detailed analysis of hierarchical levels (up to 7–8 levels inclusive) can be placed in an appendix so as not to overload the main text. It is important to emphasize that when integrated into a DT, the fault tree transforms into the ontological framework of the diagnostic model, combining traditional methods of technical diagnostics with new means of streaming analytics and cognitive modeling

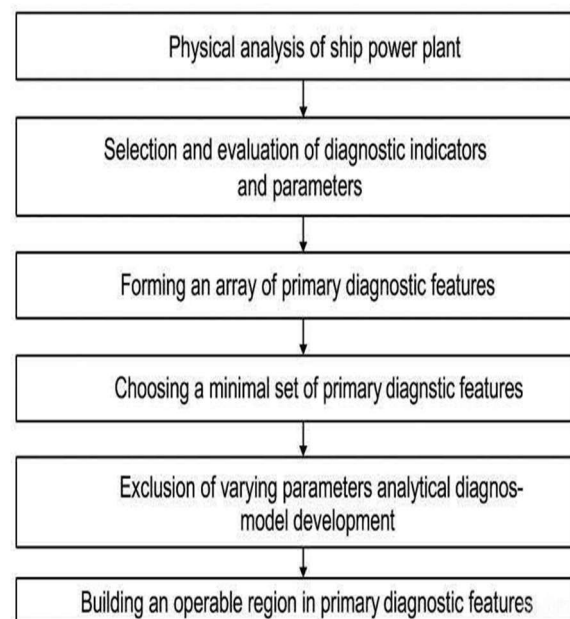


Fig. 1. Stages of constructing diagnostic models

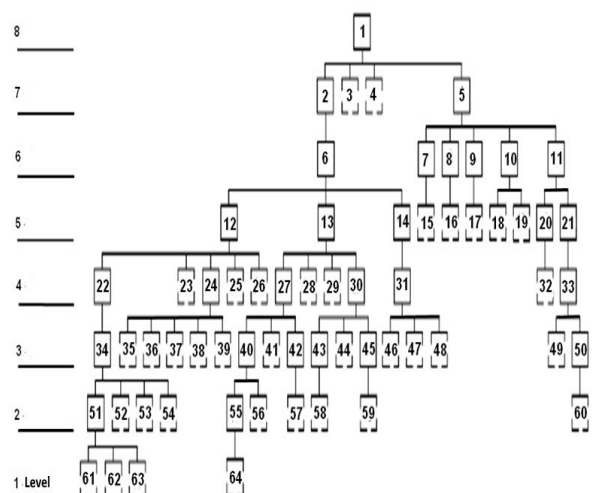


Fig. 2. Structure of the "fault tree": 1-Main diesel engine; 2,...,64 engine components

The hierarchy reflects the block-modular structure of the system: Level 7 (bottom) represents basic element failures; Level 5 represents sub-

system failures; and Level 1 (top) represents the aggregated main engine failure.

In traditional studies, the fault tree was used as a static model reflecting the interconnections of elements at different levels. However, under the conditions of a DT, it acquires a dynamic function: the nodes of the tree are synchronized with sensor data streams as well as with risk assessment models. Thus, the failure or degradation of a specific element is recorded not only as a hypothetical scenario but also as an event confirmed by telemetry and model prediction. The probability of the top event failure, $P(T)$, is estimated based on the probabilities of the basic events, $P(E_i)$, by aggregating the set of minimal cut sets, M_j . To ensure computational efficiency and maintain the required update frequency within the digital twin environment, this relationship is defined using the Min Cut Upper Bound approximation [16]:

$$\begin{cases} P(T) \leq 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P(M_j)) \\ P(M_j) = \prod_{i \in M_j} P(E_i) \end{cases}$$

where $P(E_i)$ is the probability of the i -th basic event (failure of a specific engine component or sensor anomaly);

M_j is the probability of occurrence of the j -th minimal cut set;

n is the total number of minimal cut sets identified in the fault tree;

$P(T)$ is the resulting probability of the top event (aggregated failure of the main diesel engine)

In the proposed DT architecture, the key innovation is that the probabilities of the basic events, $P(E_i)$, which serve as inputs to this calculation, are dynamically recalculated in real time based on streaming telemetry and the forecasts from the decision-tree-based classifier (DCT) model and error classifier. This ensures that $P(T)$ reflects the current, observed degradation and not just static statistical averages.

At each level of the fault tree, elements possessing structural significance in the scenario of operational failure are located. The connections between the elements of different levels are established in a probabilistic interpretation, which makes it possible not only to record interdependencies but also to quantitatively assess the risk of failures. At the same time, the informational linking of the elements of the “fault tree” with diagnostic parameters enables prediction of the technical state based on current values and historical data. The quality of such forecasts largely

depends on the technical diagnostic equipment (TDE). In the classical interpretation, they performed the functions of measuring, recording, and transmitting signals. However, modern TDEs are implemented as distributed IoT nodes connected to equipment sensors and integrated into streaming platforms (Kafka, Flink, etc.). Their data are not only recorded but also transmitted in real time to the digital twin, where they undergo verification, preprocessing, and anomaly filtering procedures. As a result, a continuous diagnostic loop is created, combining physical measurements and their digital representations. Such integration significantly increases the reliability of monitoring and reduces the delay in detecting critical changes in equipment condition. Fig. 3 presents the structural diagram of the TDE, which includes the following blocks: switching and measuring block (SMB), test signal generation block (TSGB), information processing block (IPB), memory block (MB), control block (CB), indication block (IB), and registration block (RB). The abbreviations in parentheses must correspond to the English translation of the TDE elements.

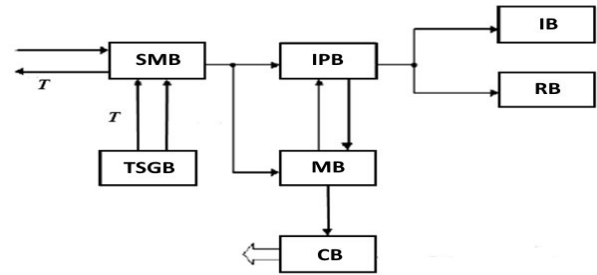


Fig. 3. Structural diagram of technical diagnostic equipment

Analysis of the processes of maintaining and restoring the technical condition of ship equipment has shown [17] that to manage their quality, it is necessary to use a combined approach that integrates the robustness of the production environment with preventive and corrective actions, ensuring a natural distribution of functions between them. Such an organization reduces the risk of delayed decisions and maintains a high level of operational readiness of the equipment. The structure of the process for managing the technical condition of the ship power plant (Fig. 4) defines a methodological framework that reflects the interrelationships of key processes: changes in technical condition (CTC), operational condition assessment (OCA), technical condition prediction (TCP), preparation for maintenance (PM), to maintenance and testing (MAT), operational

decision-making (ODM), longterm decision-making (LDM), maintenance (M), repair and testing (RT), and formation of control actions (FCA). Under modern conditions, this structure is supplemented with new forecasting and diagnostic modules based on the DT. Thus, TCP relies on streaming analytics and DCT models, while OCA includes the error classifier module, which provides noise filtering. Thus, the traditional methodological loop (Fig. 4) becomes not only a scheme of process interaction but also the basis for integrating modern digital technologies that improve forecasting accuracy, reduce response delay, and enhance the resilience of the entire system.

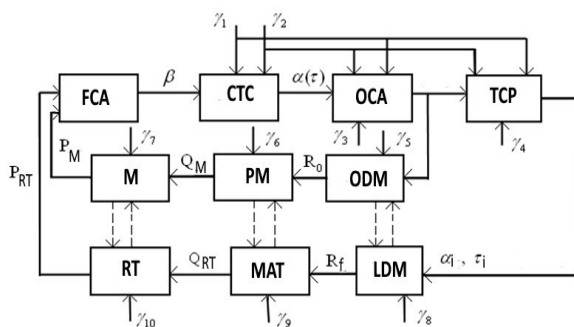


Fig. 4. Structure of the process of managing the technical condition of the SPP equipment

In Fig. 4: $\alpha(t)$ – a set of technical condition indicators; β – a set of control actions; α_i, τ_i – values of condition indicators and operating time at which the residual resource will be exhausted (forecasting result); R_O – operational management decision; R_f – long-term management decision; signals: Q_M – readiness for maintenance; Q_{RT} – readiness for repair and testing; P_M – completion of maintenance activities; P_{RT} – completion of repair work and testing; γ_1 – operating conditions of objects; γ_2 – operating modes of the object; γ_3, γ_4 – regulatory bases of operational assessment; criteria: γ_5 – for making an operational management decision; γ_6 – for preparation for maintenance; γ_7 – for maintenance quality; γ_8 – for making a long-term management decision; γ_9 – for preparation for repair; γ_{10} – for repair and testing quality.

To validate the proposed methodological framework and obtain the performance indicators presented in Tables 1-3, a series of simulation experiments were conducted. The experimental data were generated using a high-fidelity simulation model of a ship's main diesel engine, designed to replicate both nominal operating modes and various degradation scenarios (e.g., fuel system clogging, turbocharger efficiency loss, and cooling system failures). The simulation environment integrated a

physical-mathematical model of the engine with a synthetic telemetry generator, producing data streams for over 100 virtual sensors at a frequency of 1-10 Hz. This setup allowed for the systematic testing of the diagnostic loop under controlled noise levels and varying data inflow intensities. The reported KPIs (Accuracy, F1-score, Latency, etc.) represent the averaged results across multiple simulation runs, providing a statistically significant baseline for comparing autonomous diagnostic models against the integrated digital twin architecture. Table 1 demonstrates the effect of integrating DCT into the digital twin streaming platform: comparing autonomous (batch) execution with the option featuring streaming analytics and online adaptation.

Table 1

KPIs of diagnostic loop functioning

Indicator	Designation	Autonomous DCT (batch mode)	DCT as part of DT (stream analytics)
Classification accuracy	Accuracy	0.87	0.94
Precision of positive detections	Precision	0.85	0.95
Recall	Recall	0.82	0.93
F1-score	F1	0.83	0.94
Average packet processing time	t_{proc} (s)	125	68
Forecast update delay	Δ_{upd} (s)	5.0	2.1
Stability under input data degradation	R_{stab} (%)	74	91
Mean time to detect	MTTD (s)	4.7	2.6
Mean time to recovery	MTTR (s)	7.8	3.9

As can be seen from the table, integration provides simultaneous improvement in accuracy and reduction of response delays-this is explained by the presence of preprocessing mechanisms, data verification, and continuous feature updating within the DT loop. To clearly demonstrate the quantitative advantage of integration, Figure 5 graphically compares the key performance indicators (KPIs) of the diagnostic loop, highlighting the percentage change when moving from autonomous (batch) DCT processing to integrated stream analytics within the DT loop. The chart confirms simultaneous improvement in classification quality (Accuracy, F1-score) and critical reduction in temporal delays (Δ_{upd} (s), MTTD).

Analysis of Figure 5 confirms the methodological effectiveness of synchronizing the

diagnostic model (DCT) with stream analytics and the Digital Twin environment. Critically, the integration yields a simultaneous, systemic improvement across metrics of quality and temporality: classification metrics (Accuracy, F1-score) increase by 8-13%, while timecritical indicators (t_{proc} , Δ_{upd} (s), MTTD) are reduced by 40-58%. This simultaneous improvement demonstrates that the integrated architecture not only achieves higher diagnostic fidelity but, crucially, transforms the diagnostic loop from a periodic, latency-prone operation into a resilient, near-real-time

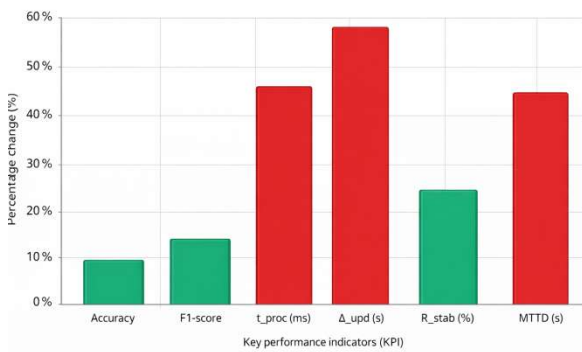


Fig. 5. Comparison of KPIs: percentage improvement due to DCT integration into the DT Loop

The proposed architecture is not limited to the use of individual methods (e.g., decision trees or fuzzy logic), but forms a methodological framework that synchronizes: data collection and preprocessing; construction and updating of diagnostic models; implementation of predictive algorithms; automation of decision-making processes.

The main feature of the developed approach is the integration of classical diagnostic tools (“fault tree,” probabilistic models, fuzzy logic methods) with new technologies of the DT, stream analytics, and cognitive modeling. This ensures the transition from discrete fault analysis to dynamic monitoring, where prediction and diagnostics are formed in real time. Unlike traditional diagnostic systems, where data processing was performed in batch mode, the proposed information environment is built on the principles of multi-level architecture:

1. Data layer - sensor nodes, distributed IoT devices recording operating parameters;
2. Preprocessing layer - noise filtering, normalization, data enrichment using the digital twin;
3. Diagnostic layer - DCT models, error classifier, and dynamic fault tree;

4. Predictive layer - algorithms for residual life prediction and critical transition detection;

5. Decision-support layer - automated generation of recommendations (operational and strategic).

For a quantitative illustration of the advantages of integrating the DCT model into the digital twin loop, consider the dynamics of reducing diagnostic data processing time and monitoring result update delay. The baseline scenario uses an autonomous DCT implementation, where data are processed in batches without continuous synchronization with sensor streams. In the integrated version, stream processing (Kafka → Flink) is applied, providing immediate data transfer to the digital twin.

Figure 6 shows the dependencies of two key indicators: t_{proc} - average diagnostic query processing time (ms); Δ_{upd} - monitoring result update delay (s).

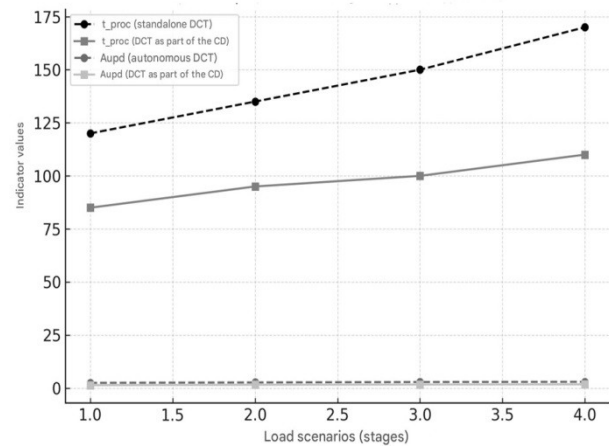


Fig. 6. Dynamics of processing time (t_{proc}) and update delay (Δ_{upd}) reduction during DCT integration into the digital twin loop

The indicator values are given in relative units (100% - baseline level of autonomous DCT). The abscissa axis shows load scenarios corresponding to increasing data inflow intensity:

1. S1 (nominal mode) - data from 100 sensors with a frequency of 1 Hz;
2. S2 (increased load) - 500 sensors, 2 Hz;
3. S3 (emergency mode) - burst load up to 1000 sensors, 5 Hz;
4. S4 (limit mode) - 1500+ sensors, 10 Hz.

In the autonomous DCT, the processing time grows linearly with increasing load, and the update delay reaches tens of seconds in emergency modes. When embedded in the digital twin, due to distributed stream processing, the growth of these indicators slows down: t_{proc} decreases by 40–60%, and Δ_{upd} - by 3–4 times.

Thus, the transition from an autonomous DCT to integration into the digital twin provides: more stable functioning of the diagnostic loop under high loads; the ability to operate in modes close to real time; a reduced probability of delayed decisions during critical changes in equipment condition.

It is especially important to emphasize that the improvement in update delay (Δ_{upd}) has a systemic effect: residual life prediction and early defect detection become practically continuous processes rather than periodic operations. This enables more accurate planning of maintenance and repair activities.

The dynamics of reducing processing time (t_{proc}) and update delay (Δ_{upd}) during DCT integration into the digital twin loop are shown in Fig. 6. As can be seen from the graph, with increasing input stream intensity, the autonomous DCT demonstrates growing delays and processing times, leading to the risk of delayed response. At the same time, integration of the DCT into the digital twin ensures more stable behavior: the values of t_{proc} and Δ_{upd} grow much more slowly due to data preprocessing, stream filtering, and distributed computation mechanisms.

For quantitative illustration, Table 2 presents numerical values of the indicators for four load scenarios: S1 – baseline mode (100 streams/s); S2 – medium mode (500 streams/s); - S3 – high mode (1000 streams/s); S4 – limit mode (2000 streams/s).

In scenarios S3–S4, the integration advantage is particularly pronounced: processing time decreases by more than 2 times; update delay - almost 2 times compared to the autonomous DCT.

Table 2

Influence of DCT integration into the DT loop on processing time and update delay

Load scenario	Load characteristic	t_{proc} , ms Standalone DCT)	t_{proc} , ms (DCT in DT)	Δ_{upd} , s Standalone DCT)	Δ_{upd} , s (DCT in DT)
S1	Baseline load (100 data streams/s)	120	85	3.5	1.2
S2	Medium load (500 streams/s)	135	95	4.8	2.1
S3	High load (1000 streams/s)	150	100	6.5	2.8
S4	Limit load (2000 streams/s)	170	110	9.2	3.5

Figure 6 reflects the absolute values from Table 2. The use of absolute units (ms for t_{proc} and s

for Δ_{upd}) demonstrates the system's stability under increasing load scenarios (S1-S4) and confirms the reduction of latency by 40-60% when integrated into the DT loop. Thus, the integration of the DCT into the DT not only improves forecasting accuracy but also significantly enhances the temporal characteristics of the diagnostic loop, enabling operation under high-load conditions without critical delay growth.

The next stage of methodological support for the information environment was the inclusion of the error classifier (ECL) module, designed for filtering erroneous classifications in dynamics. Its key task is to minimize the influence of noise and incorrect data received from sensors and intermediate algorithms. Unlike standard smoothing procedures (such as moving average or simple time filtering), the ECL operates not only at the data processing level but primarily at the model and semantic level, comparing class probabilities against the digital twin's predictive forecasts and ontological data to identify abnormal deviations. This capability to integrate high-level contextual information is the foundation of its original design. This makes it possible to significantly increase diagnostic reliability and reduce the delay in error detection.

The ECL functions as a semantic validator that resolves contradictions between the statistical predictions of the DCT model and the physical/ontological constraints of the DT. The validation algorithm is based on calculating a consensus score C for each detected state:

$$C = \omega_1 \cdot P_{DCT} + \omega_2 \cdot L_{DT}(\text{mode}, \Delta t),$$

where P_{DCT} is the probability assigned by the diagnostic model;

L_{DT} is the likelihood of the state according to the DT's physical limits and historical trends;

ω_i is the weight coefficients

Conflict resolution logic: In the event of a significant divergence between the DCT output and the DT context (e.g., the DCT predicts a critical failure while the DT observes parameters within nominal physical bounds), the DTs ontological model serves as the ultimate "ground truth". In such scenarios, the ECL implements a "veto" mechanism:

1. If the DT model confirms that the current physical regime (temperature, pressure, RPM) is incompatible with the failure class predicted by the DCT, the event is reclassified as a "Sensor Noise/Error";

2. The anomaly is then routed back to the preprocessing layer for recalibration or sensor health verification. This hierarchical approach ensures that operational decisions are governed by verified physical constraints rather than purely statistical correlations.

Table 3

Performance indicators of the error classifier as part of the DT

Indicator	Symbol	Value
Classification accuracy	Precision	0.95
Classification completeness	Recall	0.93
False positive errors	FPR	0.07
Average error detection time	MTTD (s)	2.5
Average error correction time	MTTR (s)	4.1

Analysis of Table 3 shows that the error classifier enables the system to respond to incorrect data within seconds ($MTTD < 3$ s, $MTTR < 5$ s). At the same time, a balanced ratio of Precision and Recall is achieved, minimizing both false-positive and false-negative decisions. Thus, the error classifier becomes an important methodological component of the digital twin, ensuring the stability of the entire architecture against noise and sensor data failures.

For visual representation of the operation of the developed error classifier block, Fig. 7 shows its loop within the information environment of the digital twin. Unlike autonomous solutions, the error classifier is integrated directly into the diagnostic data flow: data from sensors and IoT nodes enter the verification block, where they undergo primary filtering and comparison with the reference parameters of the digital twin; the classification block (DCT model) generates an object state prediction based on preprocessed data; the error classifier analyzes the classifier's results, identifies potentially erroneous decisions, and corrects them based on time series, probabilistic features, and historical information; the decision support system receives an already verified and refined forecast, which is used for operational and strategic management decisions (see Fig. 4).

Thus, the error classifier serves as a "dynamic reliability filter" that reduces the likelihood of incorrect decisions and significantly decreases the system's response delay when anomalous data are received.

The structural diagram of the error classifier loop within the DT environment (Figure 7) defines a critical methodological component designed to ensure diagnostic robustness against sensor noise and data degradation. Unlike standard data smoothing techniques, the error classifier operates at the model and semantic level, integrating contextual information from the DT to validate the classification output.

The information flow within this specialized diagnostic contour is organized as follows:

1. Data Layer & Ontological Layer - raw telemetry enters the preprocessing layer, while the ontological layer / DT simultaneously supplies contextual data and verification rules based on the system's reference model and historical operation trends;

2. Preprocessing Layer - this layer performs data cleaning and initial validation by comparing incoming features with the DT's physical limits, resulting in clean preprocessed features;

3. Diagnostic model (DCT) - the DCT generates classification results (probabilities of states) from the clean features, which are then passed to two distinct paths: directly to the error classifier (as direct probabilities) and to the DT Feedback Loop;

4. DT feedback loop - this module is the core of the validation process. It dynamically compares the current classification probabilities with historical trends and predicted probability changes modeled by the DT. This comparison identifies potential probabilistic anomalies that cannot be explained by normal degradation;

5. Error classifier (ECL) - the ECL receives the initial classification, alongside the contextual feedback from the DT Loop. Its unique function is to use time-series analysis and probabilistic features to confirm or reject potentially erroneous classification decisions flagged by the DT feedback. This process minimizes false positives resulting from temporary signal spikes or minor sensor failures;

6. Decision support layer - only after the classification result has been validated and, if necessary, corrected by the error classifier, is the verified state/correction passed to the final decision-making process.

This integrated approach transforms the error classifier into a dynamic reliability filter, ensuring that diagnostic decisions are based not merely on instantaneous sensor readings but on a validated consensus between the analytical model (DCT) and the contextual, historical data provided by the DT.

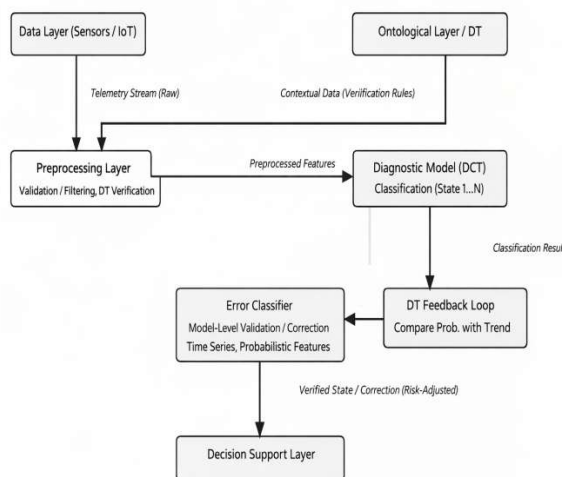


Fig. 7. Error classifier loop in the information environment of the DT

Practical implementation has shown that including the error classifier in the diagnostic loop allows:

- reducing the number of false-positive triggers by almost 20% compared to the standalone DCT;
- achieving an average error detection time (MTTD) of less than 3 seconds;
- increasing forecast stability under input data degradation by 15–18%.

These results confirm the necessity of the error classifier as a mandatory element of the methodological support for the information environment of monitoring, diagnostics, and forecasting of complex technical systems.

An important element of the methodological support is the regulation of the life cycle of diagnostic and prognostic models within the digital twin. Unlike static algorithms used in traditional systems, in the proposed architecture the models operate in the format of services (MaaS Model-as-a-Service). The adoption of the Model-as-a-Service (MaaS) architectural pattern for the diagnostic components introduces a crucial organizational and technological layer to the methodology. MaaS dictates that individual models are encapsulated, versioned, and accessed exclusively via stable APIs. This organizational principle is essential for establishing a continuous machine learning operations (MLOps) cycle for diagnostic models, encompassing automated monitoring, rapid retraining, seamless deployment (A/B testing), and model lifecycle management. This means that each

model (DCT, error classifier, residual life prediction) undergoes the following sequential stages: development and testing on a training dataset; deployment and integration into the DT; performance monitoring using KPI metrics (Accuracy, Recall, Latency, etc.); retraining on streaming data and parameter updating; versioning and publication of a new iteration. This integration ensures that the diagnostic system remains operationally relevant and continuously adapts to the evolving technical state of the CTS.

As shown in Fig. 8, the digital environment provides a continuous, closed-loop MLOps lifecycle, where model evolution is driven by real-time monitoring and physical-ontological synchronization. By adopting the MaaS paradigm, the system ensures that diagnostic and prognostic modules are not static but adaptive, retraining automatically when sensor drift is detected or when new degradation patterns emerge in the DT. This integrated process creates a robust methodological foundation for the stable and resilient operation of the CTS throughout its entire life cycle.

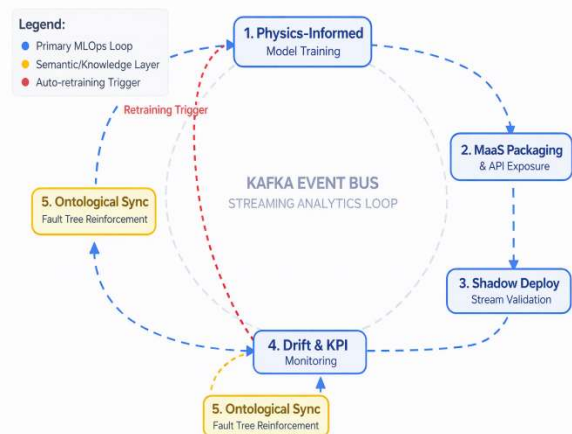


Fig. 8. Closed-loop MLOps lifecycle for CTS diagnostic models (MaaS paradigm)

To address the limitations of traditional static models, the lifecycle transition presented in Figure 8 ensures the model remains physically consistent with the engine's state through five key stages:

1. Physics-informed training - data from the simulation environment is used to train models, but results are constrained by physical laws (e.g., energy conservation in the cylinder);

2. MaaS packaging & API exposure - encapsulation of the model into a microservice for seamless integration into the diagnostic loop;

3. Shadow deployment - the model processes real-time Kafka streams without triggering control

actions, allowing for evaluation against "ground truth" telemetry before live activation;

4. Drift & accuracy monitoring - automated KPI tracking. If Accuracy drops below a threshold due to equipment wear or sensor degradation, a "Retraining Trigger" is activated;

5. Ontological synchronization - new failure patterns discovered during operation are used to update the "Fault Tree" structure, closing the loop between data-driven models and expert knowledge.

The implementation of the error classifier module and the integration of adaptive DCT models into the DT architecture demonstrate that the information environment cannot be viewed merely as a collection of isolated analytical tools. Instead, it functions as a multi-level, synchronized system where the MaaS lifecycle ensures the continuous alignment of data-driven predictions with the evolving technical state of the physical object. This systemic approach effectively eliminates the latency and accuracy trade-offs inherent in traditional diagnostic systems, providing a scalable framework for the proactive maintenance of complex technical systems.

The implementation of the error classifier module and the integration of DCT models into the digital twin have confirmed that the information environment cannot be viewed as a set of isolated tools but must function as a multi-level system.

This is illustrated, in particular, in Table 3, where the transition from a standalone DCT to a DCT integrated into the digital twin results in an increase in classification accuracy (from 0.87 to 0.94) and a reduction in forecast update delay (from 5.0 to 2.1 seconds). Additionally, Fig. 5 shows the dynamics of decreasing processing time and latency when the diagnostic loop is included in the digital twin, confirming the effectiveness of streaming analytics.

The performance indicators of the error classifier (Table 3) demonstrate an improved balance between classification precision and recall and a significant reduction in the system's response time to incorrect data. Finally, the use of a dynamic "fault tree" (Fig. 2) has shown the feasibility of automatically linking faults with telemetry, which forms the basis of the ontological level of the digital twin.

Thus, it is the integrated architecture implementing the end-to-end cycle "data collection → preprocessing → diagnostics → forecasting → decision support" that ensures not declarative but quantitatively confirmed improvement of monitoring and diagnostics characteristics for complex technical systems.

The set of presented results confirms the necessity of transitioning from fragmented diagnostic solutions to an integrated architecture that ensures stable operation under conditions of uncertainty and large data streams. The key principle here is the multi-level structure of the information environment, where each level performs strictly defined functions and passes results to the next stage. Thus, the data collection level is represented by distributed sensor nodes and IoT devices forming the telemetry stream. At the preprocessing level, noise filtering, normalization, and parameter verification are carried out based on the digital twin. The diagnostic level combines DCT models, the error classifier, and the dynamic "fault tree," enabling real-time defect identification. The prognostic level is responsible for calculating the remaining life, predicting degradation scenarios, and identifying pre-failure transitions. Finally, the decision support level provides automated generation of control actions and recommendations for operators.

This approach allows implementing a closed-loop "physical system ↔ digital model ↔ control action," where the results of diagnostics and forecasting not only reflect the current state but also serve as the basis for proactive management. This is the fundamental difference between the proposed architecture and traditional systems, in which data processing was batch-based and did not allow maintaining the required level of responsiveness. Below is a diagram of the multi-level information environment that reflects the logic of the structure and interaction of the described levels (Fig. 9). The analysis of the developments presented above (DCT models, error classifier, prognostic algorithms, dynamic "fault tree") shows that each contributes independently to improving the quality of monitoring and diagnostics of complex technical systems. However, their real effectiveness is manifested only when they are combined into a single information environment. The results of experimental studies have made it possible to identify the requirements for such an environment: the need for streaming data processing, integration with the digital twin, and the presence of diagnostic, prognostic, and decision support levels. Therefore, the multi-level architecture shown in Fig. 9 is not considered an initial theoretical scheme but rather a generalized conclusion of the conducted work. It consolidates specific results and demonstrates their place within a coherent system that closes the full cycle "data collection → preprocessing → diagnostics → forecasting → decision support."

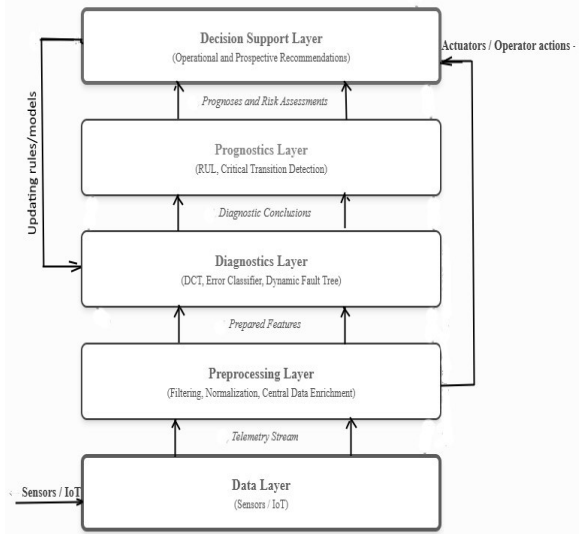


Fig. 9. Multilevel architecture of the information environment for monitoring and diagnostics of CTSs

Figure 9 demonstrates the fundamental organization of the proposed information environment. The key components and their interactions are briefly described below.

1. Data Level (sensors / IoT). Telemetry, events, and metadata are collected by distributed IoT nodes and sensor complexes. At this level, important issues include synchronization, time-stamping, local preprocessing, and ensuring transmission to the streaming bus (Kafka, MQTT, etc.).

2. Preprocessing level. This level performs data validation and verification (matching measurements with digital twin models), noise and outlier filtering, normalization, and enrichment (feature engineering) using auxiliary data from the digital twin and metadata (ontology descriptions). For streaming operation, engines such as Flink/Streams are used; for batch processing — separate ETL channels.

3. Diagnostic level. This level hosts diagnostic modules: DCT (Decision-Tree-based Classifier), error classifier (module for detection and classification of distortions/anomalies), and the dynamic version of the “fault tree,” presented as an ontology. Diagnostic outputs are generated both in online mode (streaming events) and as results of periodic retraining/validation.

4. Prognostic level. At this level, algorithms are employed for residual useful life (RUL) estimation, detection of pre-failure transitions, and calculation of probabilistic event development scenarios (what-if simulations, Monte Carlo, hybrid physical-statistical models). Within the digital twin, accelerated simulations and scenario calculations

can be performed to assess the consequences of control actions.

Within the prognostic layer of the information environment, the primary task is to estimate the *RUL* of the complex technical system. Unlike static maintenance schedules, the proposed framework utilizes the dynamic failure probability $P(T)$ calculated at the diagnostic level to project the system's trajectory toward a critical threshold. The *RUL* at the current time step t_k is estimated using a trend-extrapolation approach based on the moving average of the probability gradient:

$$RUL = \frac{P_{limit} - P(T, t_k)}{\langle \dot{P}(T, t_k) \rangle_\omega},$$

where P_{limit} is the pre-defined critical probability threshold (e.g., 0.1 or 0.15) at which the risk of failure becomes unacceptable;

$P(T, t_k)$ is the current probability of the top-event failure at time t_k ;

$\langle \dot{P}(T, t_k) \rangle_\omega$ is the weighted average rate of probability change over a time window ω , calculated as:

$$\langle \dot{P}(T, t_k) \rangle_\omega = \frac{1}{\omega} \cdot \sum_{m=0}^{\omega-1} \frac{P(T, t_{k-m}) - P(T, t_{k-m-1})}{\Delta t}$$

This formulation allows the DT to adapt to varying operational intensities. If the engine load increases, the rate of probability growth $\dot{P}(T)$ rises, causing the *RUL* estimate to decrease proportionally. This dynamic feedback ensures that the maintenance recommendations provided at the decision support level remain synchronized with the actual observed degradation rate.

To demonstrate the practical application of the proposed *RUL* estimation formula, a quantitative scenario was simulated where the system undergoes a shift in operational intensity. Figure 10 illustrates the transition of the failure probability $P(T)$ from a nominal degradation state to an accelerated mode, highlighting the prognostic engine's sensitivity to real-time changes in the probability gradient.

As observed in Figure 10, the system initially operates under a nominal degradation rate ($\dot{P} \approx 0.0003/\text{h}$). At the 200-hour mark, a simulated load increase event occurs, causing an immediate shift in the slope of the probability curve. The prognostic layer detects this change within a single observation window, recalculating the gradient to $\dot{P} \approx 0.0020/\text{h}$. Consequently, the intersection point with the critical threshold $P_{limit} = 0.15$ is automatically adjusted, providing an updated *RUL*

of 45 hours. This dynamic adjustment confirms the framework's ability to move beyond static maintenance schedules and provide resilient, context-aware forecasts that adapt to the actual technical condition of the CTS.

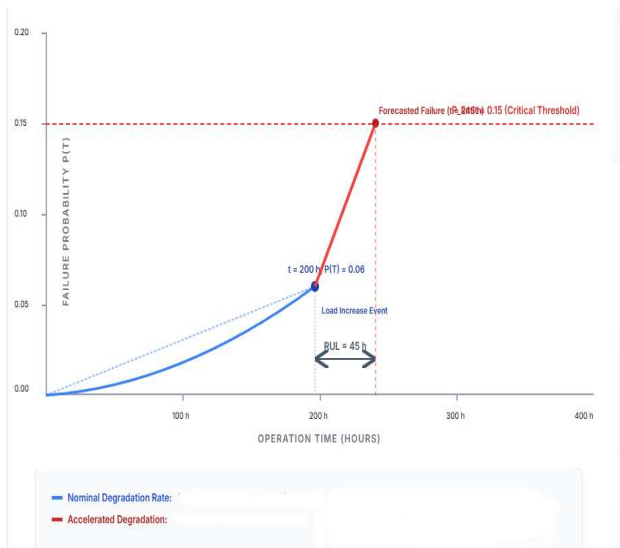


Fig. 10. Quantitative *RUL* estimation based on failure probability gradient

5. Decision support level. Resulting recommendations (prescriptive actions) are generated considering criteria of cost, risk, downtime, and resource availability and are transmitted to both operators and automated control systems. If an automated mode is selected, the decisions are integrated with controllers/actuators via secure interfaces.

The scheme includes direct “bottom-up” telemetry flows and feedback mechanisms: forecasting results and control decisions are used to update diagnostic rules, revise features, and retrain models (feedback loop). This closes the “target cycle” of the digital twin, allowing the system to adapt to changing operational modes and improve the quality of recommendations over time. Technical notes and implementation recommendations: the streaming loop is recommended to be built on a distributed event bus (Kafka) and a stream processing engine (Flink or Kafka Streams) - it is important to maintain offset retention and replay capabilities for model retraining; for preprocessing and diagnostic levels, a microservice architecture (Model-as-a-Service) should be used: individual models must be encapsulated and invoked via API, ensuring versioning and A/B testing; a quality metrics module (KPI) must be provided: LAT (processing latency), t_{proc} (average packet processing time), Δ_{upd}

(forecast update delay), R_{stab} (stability under input data degradation), Accuracy/Precision/ Recall/F1 for diagnostics; the ontological layer (link between the “fault tree” and digital twin metadata) should store the CTS topology and the mapping rules between sensor parameters and tree nodes - this is crucial for automated defect localization and estimation of impact on related elements.

Thus, the multilevel architecture of the information environment (Fig. 8) integrates all the solutions proposed in this subsection - from DCT and Error Classifier to prognostic modules and the ontological fault tree - into a unified system for monitoring, diagnostics, and forecasting support.

Conclusions. This paper presents an integrated methodological framework for the monitoring, diagnostics, and prognostics of CTS, using ship power plants as a primary example, which effectively overcomes the limitations of traditional batch data processing systems by synthesizing classical tools such as fault trees and fuzzy logic with modern technologies of digital twins and streaming analytics. The study confirms that the transition from standalone diagnostic models to an integrated digital twin loop provides a systemic efficiency gain, manifested in an increase in classification accuracy from 0.87 to 0.94 and a significant reduction in forecast update latency from 5.0 to 2.1 seconds, thereby validating the necessity of synchronizing predictive models with continuous telemetry streams via Kafka/Flink for real-time monitoring. The methodological robustness of the proposed architecture is achieved through the implementation of an error classifier (ECL) module, which acts as a semantic validator and provides a 20% reduction in false-positive triggers by implementing a “veto” mechanism based on the ontological and physical constraints of the DT, ensuring the physical consistency of diagnostic decisions under critical operating conditions. The application of the MaaS paradigm and a closed-loop MLOps lifecycle ensures the adaptability of diagnostic modules to natural equipment degradation and sensor drift, allowing for automated retraining and shadow deployment of models without compromising diagnostic reliability. The practical significance of this work lies in the development of a scalable and fault-tolerant platform for proactive maintenance that enables the early identification of hidden degradation patterns in components, contributing to reduced operational costs and the prevention of emergency situations. Future research prospects are associated with expanding the ontological layer for multi-agent coordination of subsystems and

implementing federated learning methods to refine models at the fleet scale, ultimately facilitating the transition to fully autonomous self-diagnosing power plants with minimal operator intervention.

References

1. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Polyvianchuk A. Complex technical system condition diagnostics and prediction computerization. CEUR Workshop Proceedings. 2020. Vol. 2608. P. 42–56.
2. Vychuzhanin V. V., Vychuzhanin A. V. 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>.
3. Vychuzhanin V. V., Vychuzhanin A. Digital methods and models for control and survivability of complex technical systems: monograph. Lviv–Torun: Liha-Pres; 2025. 366 p. DOI: <https://doi.org/10.36059/978-966-397-556-6>.
4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
5. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
6. Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S. Digital twin for maintenance: a literature review. Computers in Industry. 2020. Vol. 123. Article 103316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>.
7. Tao F., Qi Q. Make more digital twins. Nature. 2019. Vol. 573, No. 7775. P. 490–491. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>.
8. Abd Wahab N. H., et al. Systematic review of predictive maintenance and digital twin technologies: challenges, opportunities, and best practices. PeerJ Computer Science. 2024. Article e1943. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1943>.
9. 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, No. 8. Article 2625. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25082625>.
10. Hedayati Kia S., Dunai L., Antonino-Daviu J. A., Razik H. Real-time digital twins for intelligent fault diagnosis and condition-based monitoring of electrical machines. Energies. 2025. Vol. 18, No. 17. Article 4637. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18174637>.
11. Ma S., Flanagan K. A., Bergés M. State-of-the-art review: the use of digital twins to support artificial intelligence-guided predictive maintenance. arXiv. 2024. arXiv:2406.13117v1 [cs.AI]. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.13117>.
12. Ismail L., Abdelmoti A., Basu A., Berini A. D. E., Naouss M. A systematic review of digital twin-driven predictive maintenance in industrial engineering: taxonomy, architectural elements, and future research directions. arXiv. 2025. arXiv:2509.24443. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.24443>.
13. Hu W. Digital twin: a state-of-the-art review of its enabling technologies and applications. Journal of Industrial and Management Optimization. 2021. Vol. 2, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2020-010>.
14. Вичужанин В. В. Диагностика, контроль при эксплуатации и ремонте систем кондиционирования воздуха на основе гибридных нейро-нечетких экспертных систем. Вісник ОНМУ. 2010. № 30. С. 100–109.
15. ISO 17359:2003(E). Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. Geneva: ISO; 2003.
16. Rausand M., Barros A., Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2020. ISBN: 978-1-119-37352-0.
17. Вичужанин В. В., Рудниченко Н. Д. Методы информационных технологий в диагностике состояния сложных технических систем: монография. Одесса: Екологія; 2019.

Вичужанин В. В.,

Вичужанин О. В.

Інтегрована система цифрового двійника для адаптивної діагностики складних технічних систем

У статті представлено комплексну методологічну основу створення інтегрованого інформаційного середовища для моніторингу, діагностики та прогнозування технічного стану складних технічних систем (СТС) на прикладі суднових енергетичних установок. Актуальність роботи зумовлена необхідністю переходу від фрагментованих і статичних аналітичних методів до динамічних систем управління життєвим циклом обладнання в режимі реального часу. Основну увагу зосереджено на синтезі класичних підходів, зокрема імовірнісних графів і дерев відмов, із сучасними технологіями, такими як цифрові двійники (Digital Twin, DT), потокова аналітика великих даних та парадигма «Model-as-a-Service» (MaaS). Наукова новизна дослідження полягає у розробленні адаптивної архітектури, в межах якої традиційне статичне дерево відмов трансформується у динамічну онтологічну структуру. Запропоновано математичну модель розрахунку ризику на основі апроксимації Min Cut Upper Bound, що забезпечує обчислювальну ефективність під час обробки високої інтенсивності телеметричних потоків із використанням Kafka та Flink. У роботі описано оригінальну архітектуру класифікатора помилок, який функціонує як семантичний валідатор. Реалізація механізму «veto», заснованого на фізичних

обмеженнях цифрового двійника, дозволила знизити рівень хибнопозитивних спрацьовувань діагностичної моделі на 20 %, забезпечивши пріоритет фізичної узгодженості над статистичними кореляціями. Практичну значущість дослідження підтверджено результатами імітаційного моделювання різних сценаріїв деградації компонентів двигуна. Експериментальні дані свідчать, що інтеграція прогностичних моделей у контур цифрового двійника забезпечує системну перевагу: точність класифікації зростає з 0,87 до 0,94, а затримка оновлення прогнозу скорочується більш ніж удвічі — з 5,0 до 2,1 с. Запропоновано методологію управління життєвим циклом моделей на основі замкненого циклу MLOps, що включає фізично обґрунтоване навчання, тіньове розгортання та автоматизоване виявлення дрейфу характеристик. У роботі формалізовано алгоритм обчислення залишкового корисного ресурсу (Remaining Useful Life, RUL) на основі динамічного градієнта ймовірності, що дає змогу системі адаптуватися до змін інтенсивності експлуатації в режимі реального часу. Сформована багаторівнева архітектура інформаційного

середовища, яка охоплює рівні збору даних, попередньої обробки, діагностики, прогнозування та підтримки прийняття рішень, становить завершене методологічне рішення для проактивного технічного обслуговування та переходу до автономних систем моніторингу СТС.

Ключові слова: цифровий двійник; складні технічні системи; потокова аналітика; адаптивна діагностика; дерево відмов; прогнозування залишкового ресурсу; MLOps.

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

Стаття подана 11.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-19-27>

УДК 004

МОДЕЛІ КОМАНДНОЇ РОБОТИ В ІТ-ПРОЄКТАХ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Доля О.Є., Доля Е.К.

TEAMWORK MODELS IN IT PROJECTS AND THEIR IMPACT ON SOFTWARE DEVELOPMENT EFFICIENCY

Dolia O.E., Dolia E.K.

У статті досліджено моделі командної роботи в ІТ-проєктах та проаналізовано їх вплив на ефективність процесу розробки програмного забезпечення. Актуальність дослідження зумовлена зростаючою складністю сучасних ІТ-систем, підвищенням вимог до якості програмних продуктів, збільшенням ролі міждисциплінарних команд і поширенням гнучких підходів до організації розробки. У роботі розглянуто основні підходи до формування та функціонування ІТ-команд, зокрема класичні та сучасні моделі командної роботи, що застосовуються у процесі створення програмного забезпечення.

Особливу увагу приділено аналізу моделей Agile, Scrum та DevOps як найбільш поширених у сучасних ІТ-проєктах. Проаналізовано ключові характеристики зазначених моделей, включаючи розподіл ролей, відповідальності учасників команди, механізми взаємодії та комунікації, а також особливості прийняття управлінських і технічних рішень у процесі розробки. Визначено, що ефективність командної роботи значною мірою залежить від чіткого визначення ролей, прозорого розподілу відповідальності, рівня залученості учасників та наявності налагоджених каналів комунікації між усіма зацікавленими сторонами ІТ-проєкту.

У статті також розглянуто основні проблеми, що виникають під час організації командної роботи, зокрема конфлікти відповідальності, комунікаційні бар'єри, труднощі координації діяльності в умовах розподілених команд і вплив людського фактора на результати проєкту. На основі проведеного аналізу узагальнено вплив різних моделей командної роботи на якість, швидкість та результативність розробки програмного забезпечення, а також окреслено практичні рекомендації щодо підвищення продуктивності команд.

Окреслено перспективи розвитку командних моделей в ІТ з урахуванням сучасних тенденцій цифровізації, віддаленої роботи, автоматизації процесів розробки та застосування інструментів колаборації. Отримані результати можуть бути використані при виборі та адаптації моделей командної роботи в ІТ-проєктах з метою підвищення ефективності розробки програмного забезпечення та оптимізації управління проєктами.

Ключові слова: ІТ-проєкт, командна робота, моделі розробки, Agile, Scrum, DevOps, ефективність.

Вступ. Стрімкий розвиток інформаційних технологій та зростання складності програмних систем зумовлюють підвищення вимог до організації процесу розробки програмного забезпечення. У сучасних ІТ-проєктах ключову роль відіграє не лише технічна складова, а й ефективна командна взаємодія між учасниками процесу розробки. Саме від узгодженості дій, чіткого розподілу ролей та відповідальності залежить якість, своєчасність і стабільність створюваного програмного продукту. У зв'язку з цим проблема вибору та застосування моделей командної роботи в ІТ-проєктах є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору.

Питання організації командної роботи в ІТ-сфері розглядаються у працях багатьох науковців. Зокрема, у роботах, присвячених гнучким методологіям розробки програмного забезпечення, наголошується на важливості міжособистісної комунікації та самоорганізації команд. У дослідженнях, що аналізують модель Scrum, акцент робиться на ролях учасників

команди та їх відповідальності за досягнення спільного результату. В інших публікаціях розглядається підхід DevOps, який передбачає тісну взаємодію команд розробки та експлуатації з метою підвищення ефективності життєвого циклу програмного забезпечення. Разом з тим, більшість існуючих робіт зосереджуються на окремих моделях або аспектах командної роботи, що зумовлює необхідність узагальненого аналізу моделей командної взаємодії в IT-проектах та їх впливу на ефективність розробки.

Метою роботи є аналіз моделей командної роботи в IT-проектах та визначення їх впливу на ефективність процесу розробки програмного забезпечення.

Для досягнення поставленої мети у статті необхідно розв'язати такі задачі: проаналізувати основні моделі командної роботи, що застосовуються в IT-проектах; визначити ролі та відповідальність учасників IT-команд у межах різних моделей розробки; дослідити особливості взаємодії та комунікації в командах; узагальнити вплив командних моделей на результативність процесу розробки програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання організації командної роботи в IT-проектах активно досліджується вітчизняними вченими. У науковій літературі значна увага приділяється аналізу моделей розробки програмного забезпечення, ролей учасників проєктних колективів, механізмів комунікації та факторів, що впливають на ефективність командної взаємодії. Такий інтерес зумовлюється необхідністю підвищення якості та результативності розробки програмних продуктів в умовах зростаючих вимог до їх функціональних і нефункціональних характеристик.

Ряд досліджень присвячено теоретичному обґрунтуванню та практичному застосуванню гнучких підходів до розробки. У праці [1] було виконано аналіз проблем організації командної взаємодії в умовах віддаленої роботи за методологією Agile. Авторами було встановлено, що традиційні підходи потребують суттєвої адаптації до цифрового середовища, з урахуванням багатьох факторів, таких як асинхронність, втрата неформальних каналів зв'язку та психологічне виснаження учасників команди.

Зокрема, у праці [2] розглядається сутність Agile-методологій як важливого інструменту для забезпечення адаптивності процесів і

узгодження стратегічних цілей. Аналіз проведених досліджень дозволяє виявити, що основними проблемами впровадження Agile-методологій залишаються інерційність культури, кадрові обмеження, бюджетування й контроль. Проведений аналіз дав змогу обґрунтувати рекомендації щодо інтеграції методологій на основі адаптації управлінських процедур, розвитку цифрових компетентностей персоналу та формування системи оцінювання, орієнтованої на створення цінності.

Інший напрямок цього дослідження зосереджується на конкретних моделях гнучких методологій, зокрема Scrum. У роботі [3] детально проаналізовано структуру Scrum-команди, окреслено ключові ролі та встановлено принципи роботи програми. Ця методологія зарекомендувала себе як ефективний підхід до управління проєктами через гнучкість та адаптивність, регулярний зворотний зв'язок, високу продуктивність і прозорість робочого процесу. Проте успішне впровадження цієї методології потребує розуміння всіх принципів, підготовки IT-персоналу та гнучкості в адаптації методології до певних умов.

В іншій статті [4] підкреслено, що Scrum побудований навколо короткострокових ітерацій (спринтів) зазвичай 1-4 тижні. Поетапно створюється продукт бо кожен спринт завершується готовим до використання інкрементом. Завдяки такому ітеративному підходу команда проєкту може швидко реагувати на зміни вимог і поступово надавати результат, що робить цю модель найкращою для реалізації та виконання складних проєктів.

Окремі роботи присвячено моделі DevOps як інтегрованому підходу до взаємодії команд розробки та експлуатації. Дослідження [5] присвячено вивченню основних аспектів інтеграції для концепції DevOps, яка широко використовується великими IT-компаніями, які розробляють та надають послуги з випуску програмного забезпечення. В статті охарактеризовано основні проблеми інтеграції DevOps такі як організаційні обмеження, складність інтеграції інструментів та процесів, навчання та підготовка персоналу, де основними проблемами є дефіцит кваліфікованих кадрів та інші.

У дослідженні [6] розглянуто, що DevOps це методологія та культура в IT, що об'єднує розробку програмного забезпечення та IT-операції для прискорення створення, тестування та розгортання продуктів шляхом автоматизації та покращення співпраці між командами.

Основними перевагами є швидкість роботи, ефективна спільна робота команди та постійна інтеграція, а недоліком є надмірна залежність від інструментів, бо після створення структури спочатку потрібно зайнятися командою та процесами.

Крім того, у публікаціях [7-8] розглядаються загальні проблеми командної взаємодії, такі як комунікаційні бар'єри, конфлікти щодо відповідальності, управління знаннями, вплив віддаленої роботи на ефективність команд, зміни в технологіях, ринкові умови, конкуренція. Аналізуючи ці праці, можна стверджувати, що існує значна кількість концептуальних підходів до дослідження командної роботи, проте недостатньо узагальнень, що дозволяють комплексно оцінити взаємозв'язок між моделями командної роботи, ролями учасників та результатами ІТ-проектів.

Таким чином, хоча сучасні дослідження висвітлюють окремі аспекти організації командної взаємодії, зокрема теоретичні основи, структуру ролей та практики взаємодії в рамках певних моделей розробки, відсутні систематизовані підходи, які б узагальнили ці елементи та досліджували їхній комплексний вплив на ефективність розробки програмного забезпечення. Саме це визначає потребу подальшого наукового аналізу та формує основу для проведеного в статті дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Командна робота в ІТ-проектах є ключовим чинником, що визначає ефективність процесу розробки програмного забезпечення. У сучасних умовах створення програмних продуктів відбувається в межах складних організаційних структур, де результат залежить від узгодженої діяльності фахівців різного профілю. Вибір моделі командної роботи безпосередньо впливає на розподіл ролей, відповідальності, механізми взаємодії та способи прийняття рішень у межах ІТ-проекту.

Однією з найбільш поширених моделей організації командної роботи є гнучкі підходи до розробки програмного забезпечення, які ґрунтуються на принципах адаптивності та ітеративності. У межах таких моделей команда розглядається як самостійна одиниця, здатна швидко реагувати на зміни вимог та умов реалізації проекту. Важливою особливістю є тісна взаємодія між членами команди, що забезпечується регулярними комунікаціями та спільною відповідальністю за результат.

Модель Scrum передбачає чітко визначену структуру команди та формалізований розподіл ролей. Основна увага зосереджується на координації роботи команди через ітераційні цикли, що дозволяє поступово уточнювати вимоги та контролювати якість результатів. Такий підхід сприяє підвищенню прозорості процесу розробки та дає змогу своєчасно виявляти проблеми, пов'язані з організацією командної роботи. У команді Scrum є три основні ролі [9]: власник продукту, який визначає пріоритети та бачення продукту; скрам майстер, який забезпечує дотримання фреймворку та усуває перешкоди; команда розробників, яка створює продукт, є кросфункціональною та самоорганізованою, і зазвичай складається з 3-9 людей. Разом з тим ефективність Scrum значною мірою залежить від рівня залученості учасників команди та їх готовності брати на себе відповідальність за виконання поставлених завдань.

Іншою поширеною моделлю командної роботи є DevOps, яка орієнтована на інтеграцію процесів розробки, тестування та експлуатації програмного забезпечення [10]. У цій моделі командна взаємодія виходить за межі традиційної структури ІТ-команди та передбачає тісну співпрацю між різними функціональними групами. Такий підхід дозволяє зменшити кількість помилок на етапах впровадження та супроводу програмного продукту, а також підвищити швидкість реагування на зміни. Водночас впровадження DevOps потребує змін у організаційній культурі та чіткого визначення відповідальності між учасниками процесу.

Незалежно від обраної моделі командної роботи, важливу роль відіграє ефективна комунікація між учасниками ІТ-проекту [11]. Відсутність налагоджених каналів обміну інформацією може призводити до затримок у виконанні завдань, помилок у розумінні вимог та зниження якості кінцевого продукту. Особливо актуальною ця проблема є в умовах розподілених або віддалених команд, де взаємодія здійснюється за допомогою цифрових засобів комунікації.

Окрему увагу слід приділити розподілу відповідальності в ІТ-командах [12]. Чітке визначення зон відповідальності дозволяє уникнути дублювання функцій та зменшити ризик виникнення конфліктів. Водночас надмірна формалізація ролей може обмежувати гнучкість команди та знижувати її здатність адаптуватися до змін. Таким чином, ефективна

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей командної роботи в IT-проектах [1; 3; 9; 13]

Модель командної роботи	Основні ролі	Рівень гнучкості	Особливості взаємодії	Вплив на ефективність
Agile	Команда розробки, замовник	Високий	Постійна комунікація, ітерації	Підвищення адаптивності
Scrum	Product Owner, Scrum Master, команда	Високий	Регламентовані зустрічі	Прозорість процесів
DevOps	Власник продукту, інженери, реліз-менеджер, адміністратори	Середній-високий	Інтеграція процесів	Скорочення часу розгортання
Класична модель	Керівник, розробники	Низький	Ієрархічна взаємодія	Стабільність вимог

Таблиця 2

Основні ролі учасників IT-команди та їх відповідальність (сформовано авторами)

Роль	Основні функції	Відповідальність
Розробник	Реалізація функціоналу	Якість коду
Тестувальник	Перевірка ПЗ	Виявлення помилок
Аналітик	Формування вимог	Коректність специфікацій
Архітектор	Проектування системи	Структурна цілісність
DevOps-фахівець	Підтримка інфраструктури	Безперервність роботи

модель командної роботи має забезпечувати баланс між структурованістю та гнучкістю організації діяльності.

Для узагальнення основних характеристик зазначених моделей та визначення їх впливу на ефективність розробки доцільно здійснити їх порівняльний аналіз (табл. 1).

У таблиці 1 наведено порівняльну характеристику основних моделей командної роботи в IT-проектах, зокрема рівень їх гнучкості, особливості взаємодії та вплив на результативність процесу розробки програмного забезпечення.

Аналіз даних, представлених у таблиці 1, свідчить про те, що гнучкі моделі командної роботи, такі як Agile та Scrum, забезпечують високий рівень адаптивності та прозорості процесів, що позитивно впливає на ефективність розробки. Модель DevOps, у свою чергу, орієнтована на інтеграцію процесів розробки та експлуатації, що сприяє скороченню часу впровадження змін і підвищенню стабільності програмних систем. Класичні моделі характеризуються нижчим рівнем гнучкості, проте можуть бути доцільними в умовах чітко визначених вимог і стабільного середовища розробки.

Ефективність будь-якої моделі командної роботи значною мірою залежить від чіткого визначення ролей учасників IT-команди та розподілу відповідальності між ними [14]. У процесі розробки програмного забезпечення зазвичай задіяні фахівці різного профілю, кожен з яких виконує специфічні функції та несе відповідальність за окремі аспекти створення програмного продукту. Нечітке визначення ролей може призводити до дублювання функцій, конфліктів відповідальності та зниження загальної ефективності роботи команди.

З метою узагальнення основних ролей учасників IT-команд та їх функціональних обов'язків у таблиці 2 представлено відповідну класифікацію, що дозволяє систематизувати підходи до розподілу відповідальності в межах IT-проектів (табл. 2).

Згідно з даними таблиці 2, ключовими ролями в IT-команді є розробники, тестувальники, аналітики, архітектори та DevOps-фахівці, кожна з яких виконує визначені функції та впливає на якість кінцевого продукту. Чіткий розподіл ролей сприяє підвищенню відповідальності учасників проекту та забезпечує узгодженість їхньої діяльності [15].

Водночас у межах гнучких моделей розробки допускається часткове поєднання ролей, що дозволяє команді адаптуватися до змін і більш ефективно використовувати наявні ресурси. Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать про те, що ефективність розробки програмного забезпечення в ІТ-проектах визначається не лише технічними рішеннями, а й правильною організацією командної роботи. Використання відповідних моделей командної взаємодії та чіткий розподіл ролей і відповідальності дозволяють підвищити продуктивність команди, зменшити кількість помилок і покращити якість програмного продукту.

Незважаючи на активне впровадження сучасних підходів до організації командної роботи в ІТ-проектах, процес взаємодії між учасниками команди супроводжується низкою проблем і викликів, що можуть негативно впливати на ефективність розробки програмного забезпечення. Зростання складності ІТ-систем, скорочення термінів реалізації проєктів та постійні зміни вимог замовників зумовлюють необхідність високого рівня координації дій між фахівцями різних ролей.

Однією з ключових проблем є недостатня ефективність комунікації в команді [16-17]. Навіть за наявності формалізованих процесів обміну інформацією можливі спотворення вимог, несвоєчасне донесення змін або різне трактування поставлених завдань. Особливо актуальною ця проблема є для розподілених команд, де взаємодія відбувається переважно за допомогою цифрових засобів комунікації, що ускладнює оперативне вирішення конфліктних ситуацій.

Іншим суттєвим викликом є нечіткий розподіл ролей і відповідальності між учасниками ІТ-команди. За відсутності чіткого визначення функціональних обов'язків можливе дублювання задач, зниження відповідальності за результати роботи та виникнення конфліктів між членами команди [14]. Це особливо характерно для проєктів, у яких використовуються гнучкі методології управління, що передбачають динамічний розподіл завдань.

Важливу роль у командній роботі відіграє людський фактор [18-19], зокрема рівень професійної підготовки, мотивація та психологічна сумісність учасників проєкту. Різний досвід, стиль роботи та підходи до вирішення проблем можуть як підвищувати

якість командних рішень, так і створювати додаткові труднощі в процесі співпраці. За відсутності ефективного управління команда може втратити здатність до самоорганізації, що негативно позначається на загальних результатах проєкту.

Окремим викликом є адаптація командної роботи до умов віддаленого або гібридного формату [20-21]. З одного боку, такі формати розширюють можливості залучення фахівців, з іншого - ускладнюють контроль виконання завдань, підтримку командної згуртованості та формування спільного бачення цілей проєкту. Недостатня увага до цих аспектів може призводити до зниження продуктивності та якості програмного продукту.

Таким чином, проблеми та виклики командної роботи в ІТ-проектах мають комплексний характер і потребують системного підходу до їхнього вирішення. Урахування організаційних, комунікаційних і психологічних чинників є необхідною умовою підвищення ефективності взаємодії в ІТ-командах та досягнення поставлених цілей проєкту.

Висновки. У статті здійснено аналіз моделей командної роботи в ІТ-проектах та визначено їх вплив на ефективність процесу розробки програмного забезпечення. Дослідження показало, що в умовах зростаючої складності програмних систем та динамічних змін вимог ефективна організація командної взаємодії є одним із ключових чинників успішної реалізації ІТ-проєктів.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що сучасні гнучкі моделі командної роботи, зокрема Agile, Scrum та DevOps, забезпечують підвищений рівень адаптивності, прозорості процесів і відповідальності учасників команди. Чітке визначення ролей та розподіл функціональних обов'язків сприяють узгодженості дій, зменшенню ризику виникнення конфліктів і підвищенню якості програмного продукту. Водночас доведено, що класичні моделі командної роботи можуть залишатися доцільними для проєктів зі стабільними вимогами та жорстко регламентованими процесами.

Окрему увагу приділено ролі комунікації та взаємодії між учасниками ІТ-команд. Показано, що ефективні канали обміну інформацією та відповідний рівень відповідальності кожного члена команди є необхідною умовою підвищення результативності розробки

програмного забезпечення, особливо в умовах розподілених і віддалених команд.

Розглянуті проблеми та виклики командної роботи в IT-проектах свідчать про те, що ефективність реалізації програмних продуктів визначається не лише вибором методології управління, а й якістю взаємодії між учасниками команди, чіткістю розподілу ролей і здатністю адаптуватися до змінних умов проектного середовища. Узагальнення теоретичних підходів і виявлених труднощів дозволяє сформулювати ключові висновки щодо організації командної роботи та окреслити напрями її подальшого вдосконалення.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання адаптивних моделей командної роботи в IT-проектах з урахуванням специфіки проекту, складу команди та організаційних умов. Отримані узагальнення можуть бути використані при виборі та адаптації моделей командної взаємодії з метою підвищення ефективності розробки програмного забезпечення. Перспективи подальших досліджень полягають у поглибленому аналізі впливу людського фактору, цифрових інструментів комунікації та організаційної культури на ефективність командної роботи в IT-проектах.

Л і т е р а т у р а

1. Шкода В. М., Бондаренко Д. О., Колгатін О. Г. Концептуальна модель адаптації взаємодії учасників Agile-команд у віддаленому форматі. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 10(51). С. 2150–2161. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10\(51\)-2150-2161](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10(51)-2150-2161).
2. Костін І. Д. Аналіз ефективності використання Agile-методологій в управлінні диджитал-трансформацією організацій. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*. 2025. № 47. С. 273–281. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1876> (дата звернення: 04.02.2026).
3. Котовська І. В., Луциків І. В. Методологія Scrum як ключ до ефективного управління проектами: сучасні виклики та перспективи. *Ефективні механізми господарювання в контексті сучасної економічної теорії : зб. міжнар. наук.-практ. конф. (7–8 берез. 2025 р.)*. С. 188–192. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48408> (дата звернення: 04.02.2026).
4. Шварц І. В., Химич В. В., Гайдай А. С. Використання методології Scrum в логістиці. *Сучасні виклики сталого розвитку бізнесу : матеріали конф. (06–07 листоп. 2024 р.)*. С. 141–142. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/suchasni-vyklyky-staloho-rozvytku-biznesu/> (дата звернення: 04.02.2026).
5. Постова С. А., Мельник А. В. Досвід інтеграції DevOps: кейси великих IT проєктів. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 6(34). С. 1027–1042. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6\(34\)-1027-1042](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-6(34)-1027-1042).
6. Шабардіна Ю., Хоменко О. Особливості сучасних підходів до управління проектами в розподілених командах в IT-сфері // *Науковий вісник Полісся*. 2025. № 1(30). С. 343–356. DOI: [https://doi.org/10.25140/2410-9576-2025-1\(30\)-343-356](https://doi.org/10.25140/2410-9576-2025-1(30)-343-356).
7. Хлебнікова Т. М., Гречаник О. Є., Темченко О. В. Ефективність командної роботи та колективного прийняття рішень в організації. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. Серія: Економічні науки. 2024. № 7. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2024-7-10140>.
8. Триус Ю., Ткаченко Є. Особливості управління командою IT-проекту в умовах віддаленої роботи. *Управління розвитком складних систем*. 2024. № 60. С. 105–112. DOI: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2024.60.105-112>.
9. Віткін Л., Сингаївська О. Методологія Scrum, як інструмент механізму реалізації гнучкого підходу до змін в діяльності випробувальної лабораторії легкої промисловості. *Вчені записки Університету «КРОК»*. 2022. № 1(65). С. 67–75. DOI: <https://doi.org/10.31732/2663-2209-2022-65-67-75>.
10. Лучкевич М. Наставництво і менторинг у розробці практичних навичок при вивченні DevOps. *Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training: Methodology, Theory, Experience, Problems*. 2025. № 75. С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.31652/2412-1142-2025-75-80-87>.
11. Повстяна Ю., Гульчук Ю., Повстяна С. Роль командної роботи у забезпеченні успішного виконання навчальних проєктів студентами IT-спеціальностей. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025. № 57. С. 162–167. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-57-19>.
12. Манькута Я. М., Мальцев М. М. Інформаційно-аналітичне забезпечення економічного розвитку та конкурентоспроможності функціональної моделі управління IT-проектами в діяльності закладів освіти. *Вісник економічної науки України*. 2023. № 2(45). С. 107–111. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.2\(45\).107-111](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.2(45).107-111).
13. Немченко Т., В'юник О. Новітні підходи до управління командами в проектному IT-менеджменті. *Економіка та суспільство*. 2024.

- № 64. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-61>
14. Скрипник Т., Вознюк Л. Роль людського фактору в ризиках IT-проєкту: системний підхід до формування команди. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2025. № 355(4). С. 574–583. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-81>.
 15. Глазунова О., Золотуха Р., Шмаргун В. Моделювання системи формування ефективних команд для IT проєктів в умовах дистанційної роботи. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2023. № 15(3). С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v15i3.2626>.
 16. Декалюк О. В., Федоришина Л. М. Проблеми ефективності антикризових заходів на підприємствах торгівлі. Наукові записки Львівського університету бізнесу та права. 2024. № 43. С. 190–197. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1490> (дата звернення: 04.02.2026).
 17. Іванов О. С. Особливості внутрішніх комунікацій у фітнес-організаціях: виклики та стратегії ефективного управління. Академічні візії. 2024. № 29. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/981> (дата звернення: 04.02.2026).
 18. Тютенко Н. А. Комунікаційне забезпечення командної роботи як важлива складова системи менеджменту в умовах інформаційно-інтелектуальної економіки. Ринкова економіка: сучасна теорія і практика управління. 2025. № 1(59). С. 125–138. DOI: [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2025.1\(59\).333226](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2025.1(59).333226).
 19. Метеленко Н., Венгер О., Глушечевський В. Особливості формування та управління командою в проєктному менеджменті. Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Економіка. 2023. № 1. С. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.32782/ecovis/2023-1-9>.
 20. Абрамов М., Шеховцова В., Слободян І. Особливості управління персоналом в умовах гібридної роботи. Економіка та суспільство. 2025. № 80. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-80-125>.
 21. Гойдаш Ю., Тетерін О., Процак К. Цифрові технології для покращення комунікації та взаємодії у гібридних та віддалених командах. Економіка та суспільство. 2025. № 73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-55>.
 2. Kostin I. D. Analiz efektyvnosti vykorystannia Agile-metodolohii v upravlinni dydzhytal-transformatsiieiu orhanizatsii [Analysis of the effectiveness of using Agile methodologies in the management of digital transformation of organizations]. Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. 2025. No 47. P. 273–281. URL: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/1876> (accessed: 04.02.2026).
 3. Kotovska I. V., Lutsyiv I. V. Metodolohiia Scrum yak kliuch do efektyvnogo upravlinnia proiektamy: suchasni vyklyky ta perspektyvy [Scrum methodology as a key to effective project management: modern challenges and prospects]. Efektyvni mekhanizmy hospodariuvannia v konteksti suchasnoi ekonomichnoi teorii: zb. mizhnar. nauk.-prakt. konf. (7–8 March 2025). P. 188–192. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48408> (accessed: 04.02.2026).
 4. Shvarts I. V., Khymych V. V., Haidai A. S. Vykorystannia metodolohii Scrum v lohistytsi [Using Scrum methodology in logistics]. Suchasni vyklyky staloho rozvytku biznesu: materialy konf. (06–07 November 2024). P. 141–142. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/suchasni-vyklyky-staloho-rozvytku-biznesu/> (accessed: 04.02.2026).
 5. Postova S. A., Melnyk A. V. Dosvid intehtratsii DevOps: keisy velykykh IT proiektiv [Experience of DevOps integration: cases of large IT projects]. Nauka i tekhnika sohodni. 2024. No 6(34). P. 1027–1042. DOI: 10.52058/2786-6025-2024-6(34)-1027-1042.
 6. Shabardina Yu., Khomenko O. Osoblyvosti suchasnykh pidkhodiv do upravlinnia proiektamy v rozpodilenykh komandakh v IT-sferi [Features of modern approaches to project management in distributed teams in the IT sphere]. Naukovyi visnyk Polissia. 2025. No 1(30). P. 343–356. DOI: 10.25140/2410-9576-2025-1(30)-343-356.
 7. Khlebnikova T. M., Hrehchanik O. Ye., Temchenko O. V. Efektyvnist komandnoi roboty ta kolektyvnogo pryiniattia rishen v orhanizatsii [Effectiveness of teamwork and collective decision-making in the organization]. Mizhnarodnyi naukovyi zhurnal "Internauka". Seriya: Ekonomichni nauky. 2024. No 7. DOI: 10.25313/2520-2294-2024-7-10140.
 8. Tryus Yu., Tkachenko Ye. Osoblyvosti upravlinnia komandoiu IT-proiektu v umovakh viddalenoї roboty [Features of IT project team management in remote work conditions]. Upravlinnia rozvytkom skladnykh system. 2024. No 60. P. 105–112. DOI: 10.32347/2412-9933.2024.60.105-112.
 9. Vitkin L., Synhaivska O. Metodolohiia Scrum, yak instrument mekhanizmu realizatsii hnuchkoho pidkhodu do zmin v diialnosti vyprobuvalnoi laboratorii lehkoi promyslovosti [Scrum methodology as a tool for the mechanism of

References

1. Shkoda V. M., Bondarenko D. O., Kolhatin O. H. Kontseptualna model adaptatsii vzaïomodii uchastnykiv Agile-komand u viddalennomu formati [Conceptual model of adaptation of interaction between participants of Agile teams in a remote format]. Nauka i tekhnika sohodni. 2025. No

- implementing an agile approach to changes in the activities of a testing laboratory for light industry]. Vcheni zapysky Universytetu "KROK". 2022. No 1(65). P. 67–75. DOI: 10.31732/2663-2209-2022-65-67-75.
10. Luchkevych M. Nastavnytstvo i mentorynh u rozrobttsi praktychnykh navychok pry vyvchenni DevOps [Tutoring and mentoring in the development of practical skills in studying DevOps]. Modern Information Technologies and Innovation Methodologies of Education in Professional Training: Methodology, Theory, Experience, Problems. 2025. No 75. P. 80–88. DOI: 10.31652/2412-1142-2025-75-80-87.
 11. Povstiana Yu., Hulchuk Yu., Povstiana S. Rol komandnoi roboty u zabezpechenni uspishnoho vykonannya navchalnykh proektiv studentamy IT-spetsialnostei [The role of teamwork in ensuring the successful implementation of educational projects by IT students]. Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. 2025. No 57. P. 162–167. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-57-19.
 12. Mankuta Ya. M., Maltsev M. M. Informatsiino-analitychne zabezpechennia ekonomichnoho rozvytku ta konkurentospromozhnosti funktsionalnoi modeli upravlinnia IT-proiektamy v diialnosti zakladiv osvity [Information and analytical support for economic development and competitiveness of the functional model of IT project management in the activities of educational institutions]. Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy. 2023. No 2(45). P. 107–111. DOI: 10.37405/1729-7206.2023.2(45).107-111.
 13. Nemchenko T., Viunyk O. Novitni pidkhody do upravlinnia komandamy v proiektnomu IT-menedzhmenti [Latest approaches to team management in project IT management]. Ekonomika ta suspilstvo. 2024. No 64. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-64-61.
 14. Skrypnyk T., Vozniuk L. Rol liudskoho faktoru v ryzykakh IT-proiektu: systemnyi pidkhid do formuvannia komandy [The role of the human factor in IT project risks: a systematic approach to team formation]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. 2025. No 355(4). P. 574–583. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-355-81.
 15. Hlazonova O., Zolotukha R., Shmarhun V. Modeliuvannia systemy formuvannia efektyvnykh komand dlia IT proektiv v umovakh dystantsiinoi roboty [Modeling the system of forming effective teams for IT projects in remote work conditions]. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh i biznes-protsesiv. 2023. No 15(3). P. 69–74. DOI: 10.15673/atbp.v15i3.2626.
 16. Dekaliuk O. V., Fedoryshyna L. M. Problemy efektyvnosti antykrizovykh zakhodiv na pidpriemstvakh torhivli [Problems of the effectiveness of anti-crisis measures at trade enterprises]. Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava. 2024. No 43. P. 190–197. URL: <https://nzlulp.org.ua/index.php/journal/article/view/1490> (accessed: 04.02.2026).
 17. Ivanov O. S. Osoblyvosti vnutrishnikh komunikatsii u fitnes-orhanizatsiakh: vyklyky ta stratehii efektyvnoho upravlinnia [Features of internal communications in fitness organizations: challenges and strategies for effective management]. Akademichni vizii. 2024. No 29. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/981> (accessed: 04.02.2026).
 18. Tiuhtenko N. A. Komunikatsiine zabezpechennia komandnoi roboty yak vazhlyva skladova systemy menedzhmentu v umovakh informatsiino-intelektualnoi ekonomiky [Communication support of teamwork as an important component of the management system in the conditions of information-intellectual economy]. Rynkova ekonomika: suchasna teoriia i praktyka upravlinnia. 2025. No 1(59). P. 125–138. DOI: 10.18524/2413-9998.2025.1(59).333226.
 19. Metelenko N., Venher O., Hlushchevskyi V. Osoblyvosti formuvannia ta upravlinnia komandoiu v proiektnomu menedzhmenti [Peculiarities of team formation and management in project management]. Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu imeni Yuriiia Fedkovycha. Seriya: Ekonomika. 2023. No 1. P. 57–65. DOI: 10.32782/ecovis/2023-1-9.
 20. Abramov M., Shekhovtsova V., Slobodian I. Osoblyvosti upravlinnia personalom v umovakh hibrydnoi roboty [Peculiarities of personnel management in hybrid work conditions]. Ekonomika ta suspilstvo. 2025. No 80. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-80-125.
 21. Hoidash Yu., Teterin O., Protsak K. Tsyfrovi tekhnolohii dlia pokrashchennia komunikatsii ta vzaïomodii u hibrydnykh ta viddalenykh komandakh [Digital technologies for improving communication and interaction in hybrid and remote teams]. Ekonomika ta suspilstvo. 2025. No 73. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-73-55.

Dolia O.E., Dolia E.K. Teamwork models in it projects and their impact on software development efficiency

The article examines models of teamwork in IT projects and analyzes their impact on the effectiveness of the software development process. The relevance of the study is due to the growing complexity of modern IT systems, increasing requirements for the quality of software products, increasing the role of interdisciplinary teams and the spread of flexible approaches to the organization of development. The paper examines the main approaches to the formation and functioning of IT teams, in particular, classical and modern models of teamwork used in the process of software creation. Particular attention is paid to the

analysis of the Agile, Scrum and DevOps models as the most common in modern IT projects. The key characteristics of these models are analyzed, including the distribution of roles, responsibilities of team members, mechanisms of interaction and communication, as well as the features of making managerial and technical decisions in the development process. It was determined that the effectiveness of teamwork largely depends on a clear definition of roles, a transparent distribution of responsibilities, the level of involvement of participants and the availability of established communication channels between all stakeholders of the IT project. The article also considers the main problems that arise during the organization of teamwork, in particular conflicts of responsibility, communication barriers, difficulties in coordinating activities in distributed teams and the influence of the human factor on project results. Based on the analysis, the impact of different teamwork models on the quality, speed and effectiveness of software development is summarized, and practical recommendations for improving team productivity are outlined. The prospects for the development of team models in IT are outlined,

taking into account modern trends in digitalization, remote work, automation of development processes and the use of collaboration tools. The results obtained can be used when selecting and adapting teamwork models in IT projects in order to increase the efficiency of software development and optimize project management.

Keywords: *IT project, teamwork, development models, Agile, Scrum, DevOps, efficiency.*

Доля Олена Євгеніївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, olena.dolya@nure.ua

Доля Еліна Костянтинівна – здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності F5 “Кібербезпека та захист інформації”, навчально-науковий інститут комп’ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна

Стаття подана 05.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-28-37>

УДК 004.45: 004.38

СИСТЕМНЕ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОС UBUNTU ДЛЯ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНИХ СТЕНДІВ RASPBERRY PI

Могильний Г.А., Смагіна О.О., Донченко В.Ю.,
Швець І.М., Донченко С.М., Чамара Д.І.

UBUNTU SYSTEM SOFTWARE FOR CREATING RASPBERRY PI EDUCATIONAL STANDS

Mohylnyi H.A., Smahina O.O., Donchenko V.U.,
Shvets I.M., Donchenko S.M., Chamara D.I.

У статті розглядається актуальна проблема модернізації апаратно-програмного забезпечення навчальних комп'ютерних лабораторій закладів вищої освіти в умовах стрімкого розвитку технологій «Інтернету речей» (IoT) та вбудованих систем. Цей фактор є критично важливим для забезпечення безперервності та якості практичної підготовки інженерних кадрів у сучасних реаліях, зокрема в умовах воєнного стану, коли безпека учасників освітнього процесу виходить на перший план.

Дослідження спрямовано на розробку та практичну реалізацію комплексної методики розгортання уніфікованого програмного середовища на базі операційної системи Ubuntu для навчальних стендів, побудованих на мікрокомп'ютерах Raspberry PI 4 Model B. Акцент робиться на створенні масштабованого, ефективного рішення, яке дозволяє інтегрувати компактні обчислювальні модулі в наявну корпоративну інфраструктуру, забезпечуючи при цьому повноцінний віддалений доступ для студентів та викладачів без втрати функціональності.

У роботі детально описано алгоритм налаштування системи, який складається з послідовних кроків (етапів). Ці етапи передбачають конфігурування мережесих інтерфейсів: налаштування статичної IP-адресації та DNS-серверів для коректної ідентифікації в мережі; інтеграцію в корпоративну мережу шляхом встановлення необхідних пакетів (*realmd*, *sssd*, *adcli*), редагування конфігураційних файлів та безпосереднє введення пристрою в домен *Active Directory*; налаштування підсистеми аутентифікації PAM для автоматичного створення домашніх директорій доменних користувачів (*mkhomedir*).

У ході дослідження було виявлено та вирішено низку технічних проблем, зокрема, питання сумісності стенду з клієнтом RDP. Вирішено питання додаткових налаштувань: доступ до зовнішніх портів, автоматичне завантаження камери для перегляду результатів роботи стенду, автоматичне перезавантаження стенду при завершенні роботи зі стендом, обмеження кількості одночасних підключень. Також опрацьовано загальні механізми підключення пристроїв-стендів у корпоративну мережу та розглянуто шляхи налаштування безпечної зупинки роботи стенду у випадку відключення світла.

Реалізована схема дозволяє студентам підключатися до реального обладнання з будь-якої точки світу, використовуючи свої університетські доменні облікові записи, та виконувати лабораторні роботи, що вимагають прямої взаємодії з сенсорами, виконавчими механізмами та іншою периферією, які неможливо повноцінно відтворити в умовах віртуальної симуляції.

Ключові слова: операційна система, домен *Microsoft*, *Ubuntu*, віддалений доступ, навчальний стенд, *Raspberry PI*, навчальна комп'ютерна лабораторія, заклад освіти.

Вступ. Ринок вбудованих систем та мікроконтролерів демонструє експоненціальне зростання, що, своєю чергою, формує гострий попит на кваліфікованих фахівців, здатних не лише програмувати готові рішення, але й проектувати складні апаратно-програмні комплекси, налаштовувати взаємодію сенсорів

та володіти основами використання IoT (Інтернет речей, Internet of Things).

У цьому контексті система вищої освіти стикається з серйозним викликом: як забезпечити якісну практичну підготовку інженерів в умовах динамічних змін технологічного стека та, що особливо актуально для сьогодення, в умовах воєнного стану та обмеженого доступу до фізичних аудиторій. Традиційна модель організації навчальних комп'ютерних лабораторій, що передбачає виключно очну присутність студентів біля апаратних стендів, стає недостатньо гнучкою.

Проте вивчення мікроконтролерів та IoT має свою специфіку, яку неможливо повністю компенсувати віртуальними симуляторами (на кшталт Proteus, Tinkercad чи Cisco Packet Tracer). Симулятори, попри свою зручність, працюють в ідеалізованих умовах і не відтворюють реальних фізичних процесів, затримок у мережі, апаратних збоїв та нюансів роботи з реальними електричними сигналами. Тому виникає нагальна потреба в організації навчальних комп'ютерних лабораторій нового типу, які поєднують фізичне обладнання з технологіями віддаленого доступу, дозволяючи студентам писати код, завантажувати його в реальний мікроконтролер та спостерігати за результатом роботи (через веб-камери) з будь-якої точки світу.

Мета роботи – на засадах комплексного аналізу системного програмного забезпечення ОС Ubuntu розробити підходи до створення навчальних стендів Raspberry PI.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розвиток одноплатних комп'ютерів, зокрема серії Raspberry PI, спричинив появу розгалуженої екосистеми операційних систем, адаптованих під специфічні потреби користувачів: від початкового навчання програмуванню до професійного розгортання промислових рішень Internet of Things (IoT). Вибір програмної платформи сьогодні є визначальним фактором, що окреслює межі продуктивності та безпеки обчислювальної системи.

Огляд досліджень на тему використання Ubuntu як системного ПЗ для навчальних стендів на базі Raspberry PI демонструє перехід від простих експериментів до створення складних кластерних та IoT-систем. Одним із найпопулярніших напрямків є використання Ubuntu для навчання паралельним обчисленням. У роботі «High-Performance Computing with Raspberry PI» розглядається налаштування Ubuntu Server на Raspberry PI для створення

недорогих суперкомп'ютерів. Автори S. Taneja, J. Humphrey [1] підкреслюють, що системне ПЗ Ubuntu дозволяє перетворити Raspberry PI на повноцінний навчальний стенд для вивчення архітектури високопродуктивних систем.

У своєму дослідженні M. S. Mahdavinejad (та інші) [2] використовували Raspberry PI під керуванням Ubuntu Core як «edge» пристрої (периферійні вузли). Вони акцентували увагу на ізоляції процесів, що дозволяє студентам безпечно тестувати код без ризику «зламати» всю операційну систему стенда.

Дослідник C. J. Wright у своїй публікації [3] описує використання Ubuntu як базової ОС для розгортання вразливих контейнерів Docker на Raspberry PI. Дослідження показує, що 64-бітна Ubuntu на RPi 4 працює значно стабільніше, ніж стандартна Raspberry PI OS при роботі з інструментами аналізу трафіку та віртуалізацією.

Деякі дослідники зосереджені саме на порівнянні Ubuntu з іншими дистрибутивами, а саме дослідник Rahman у публікації «Performance Analysis of Raspberry PI OS vs. Ubuntu for IoT Edge Computing» [4] провів порівняльний аналіз споживання ресурсів (CPU, RAM). Дослідження показало, що хоча Ubuntu споживає більше пам'яті, її системна архітектура краще підходить для навчання сучасним DevOps-технологіям (Kubernetes, Docker), ніж полегшена Raspberry PI OS.

Сучасний ринок ОС для Raspberry PI можна класифікувати за кількома ключовими напрямками:

Універсальні та освітні ОС: офіційна Raspberry PI OS (колишня Raspbian) залишається стандартом де-факто завдяки своїй легкості, стабільності та інтегрованим інструментам для навчання, як-от Python та Scratch. Поруч із нею більшої популярності набуває Ubuntu, що пропонує повноцінний робочий стіл та сучасне 64-бітне середовище для професійної розробки;

Спеціалізовані інженерні платформи: для завдань кібербезпеки та пентестингу виділяється Kali Linux, а для створення вузлів розумного будинку — Home Assistant OS (HAOS), яка працює за принципом «чорної скриньки», максимально спрощуючи автоматизацію;

Специфічні та ретро-системи: окремий сегмент займають мультимедійні оболонки LibreELEC та для ретро-ігор (наприклад, RetroPie) та системи з унікальною архітектурою, як-от RISC OS, що наразі мають переважно історичну або вузькопрофільну цінність.

Таблиця 1

Зведена інформація операційних систем для Raspberry PI

Назва ОС	Особливості ОС	Актуальність	Зручність для навчання	Коментар
Raspberry PI OS	Офіційна, стабільна, легка	+++++++	Висока (вбудовані Python, Scratch)	Найкращий вибір для старту
Ubuntu	Сучасна, популярна, 64-біт	+++++++	Висока (для студентів IT/CS)	Чудова для сервера або як заміна ПК
DietPi / Home Assistant OS	Для специфічного керування	+++++	Тільки профільна (Автоматизація)	Стандарт індустрії DIY-автоматизації
RetroPie / LibreELEC	Ігровий комбайн (емулятори)	+++++	Низька (розваги)	Найкраще для ретро-ігор
Kali Linux	Інструменти для хакерів/безпеки	+++++	Тільки профільна (Кібербезпека)	Звичайному користувачеві не потрібна
Arch Linux ARM	Конструктор для профі	+++	Тільки для поглибленого вивчення Linux	Складно, для досвідчених користувачів.
Windows 10 IoT	Урізана Windows без робочого столу	Не актуальна	Ні	Проект закритий, не має сенсу
RISC OS	Дуже стара ОС.			Тільки як музейний експонат
Slackware / SARPi	Найстаріший Linux, складний			Занадто складно

В цілому, комплексна оцінка різноманітних ОС наведена у таблиці 1.

Як базову ОС навчальних стендів обрано Ubuntu для Raspberry PI (особливо для моделей 4, 400 та 5) – це не просто «альтернатива», а стандарт для багатьох розробників: має один із найбільших репозиторіїв ПЗ, підтримку контейнерів, адаптована під 64-бітну архітектуру ARM для Raspberry Pi. Повноцінний Desktop надає сучасний інтерфейс (GNOME), який виглядає і працює як повноцінний персональний комп'ютер (ПК). Це найкращий вибір для навчання програмуванню або веб-редагуванню. Нова версія Ubuntu 24.04.3 LTS для настільних ПК, ноутбуків та Raspberry PI має довгострокову підтримку, що означає п'ять років безкоштовних оновлень безпеки та обслуговування, продовжених до 12 років з Ubuntu Pro. Існує найновіша версія операційної системи Ubuntu 25.10, яка постачається з дев'ятьма місяцями оновлень безпеки та обслуговування, до липня 2026 року.

Відомо, щоб дистанційно керувати Raspberry PI з іншого пристрою у локальній мережі, необхідно скористатися типовою системною службою SSH, яка легко встановлюється за допомогою команди `sudo apt-get install ssh` та необхідна для додаткового керування або адміністрування. Більш ґрунтовний аналіз наукової літератури та

інтернет-джерел [5-11] дозволив знайти інші додаткові програмні засоби: Xrdp, NoMachine, X2go. Ці додаткові програмні засоби мають різноманітні особливості та потребують встановлення додаткових пакетів. Тому прийнято рішення, в межах цієї роботи розглянути тільки Gnome-remote, який стандартно є в налаштуваннях Ubuntu, можливості інших програмних засобів буде розглянуто в межах наступного дослідження.

В цілому створення навчального стенду, з отриманням віддаленого режиму використання, можна звести до наступних кроків. Попередньо рекомендується оновити систему за допомогою команд:

```
sudo apt-get update
sudo apt-get upgrade
```

Крок 1. Налаштовуємо статичну IP адресу та DNS. Обов'язково, в якості DNS серверу вказуємо адресу контролеру домену Microsoft AD. Виконуємо ці налаштування за допомогою додатку «Settings» меню «Network». Крім того, рекомендується відредагувати файли: `/etc/systemd/resolve.conf` – додати поля DNS і domains, а також файл `/etc/hosts` – додати основні ресурси вашої мережі (рис. 1).

```

127.0.0.1:::localhost
192.168.100.1:::serv2.ifmit.local:::serv2
192.168.100.28:::ns.ifmit.local:::ns
192.168.100.28:::servad1.ifmit.local:::servad1
192.168.100.8:::servad.ifmit.local:::servad
192.168.100.29:::conn1.ifmit.local:::conn1
192.168.100.24:::vcent1.ifmit.local:::vcent1
::1:::localhost ip6-localhost ip6-loopback
ff02::1:::ip6-allnodes
ff02::2:::ip6-allrouters

```

Рис. 1. Налаштування DNS для основних ресурсів

Крок 2. Приєднання до домену Microsoft AD з метою інтеграції списку користувачів. Встановлюємо додаткові пакети sssd, realmd, adcli та інші за допомогою команди

```
sudo apt-get install sssd, realmd, adcli
```

Перевіряємо доступність домену Microsoft AD (рис.2):

```
sudo realm -v discover
<ім'я домену>
```

```

ubuntu2@ubuntu02:~$ sudo realm -v discover ifmit.local
[sudo] password for ubuntu2:
* Resolving: ldap._tcp.ifmit.local
* Performing LDAP DSE lookup on: 192.168.100.28
* Successfully discovered: ifmit.local
ifmit.local
type: kerberos
realm-name: IFMIT.LOCAL
domain-name: ifmit.local
configured: kerberos-member
server-software: active-directory
client-software: sssd
required-package: sssd-tools
required-package: sssd
required-package: libnss-sss
required-package: libpam-sss
required-package: adcli
required-package: samba-common-bin
login-formats: %U@ifmit.local
login-policy: allow-realm-logins
ubuntu2@ubuntu02:~$

```

Рис. 2. Перевірка налаштувань для підключення до домену

Звертаємо увагу на необхідні додаткові пакети, що будуть перелічені в кінці команди та, за необхідністю, встановлюємо ці пакети.

Приєднуємося до домену.

```
sudo realm join -v -U
<ім'я адмін домену> \
<ім'я домену>
```

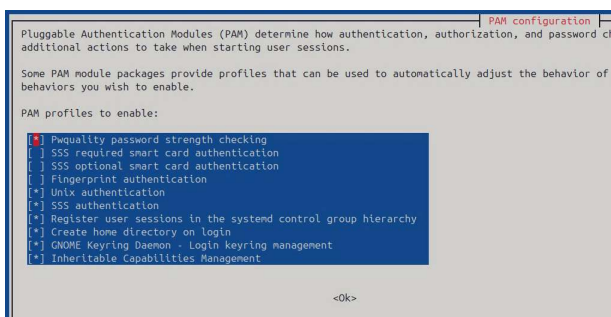


Рис. 3. PAM configurator

Надаємо право на створення домашньої папки у додатку (рис. 3):

```
sudo pam-auth-update
```

Крок 3. Активуємо службу Gnome-remote. Виконуємо ці налаштування за допомогою додатку «Settings» меню «System» – «Remote Desktop», далі закладка «Remote login». Встановлюємо ім'я користувача та пароль (рис. 4). Цього користувача не повинно бути у системі. Використовуючи ці параметри (ім'я користувача та пароль) ми вже маємо можливість приєднатися до Raspberry PI за допомогою додатку «Віддалений робочий стіл». Після підключення буде видано перелік користувачів, які останнім часом використовували цю Raspberry PI.

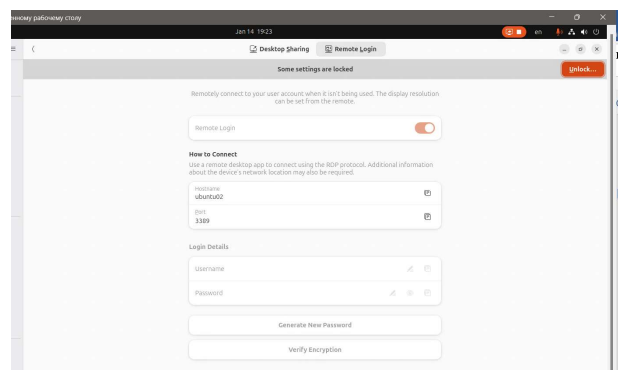


Рис. 4. Закладка Remote Login

В процесі використання клієнту «Віддалений робочий стіл» у ОС Windows встановлені певні особливості його налаштування:

1. У закладці «Екран» треба ретельно підбирати параметри роздільної здатності екрану. В деяких випадках, а особливо у режимі «На весь екран» підключення не відбувається.

2. Бажано відредагувати службовий файл, що створюється за допомогою кнопки «Зберегти» знайти рядок: use redirection server name:i:0 та змінити на use redirection server name:i:1 (рис. 5).

За умови особистого використання Raspberry PI цих кроків буде достатньо. Однак для застосування Raspberry PI у якості навчального стенду необхідно виконати додаткові налаштування.

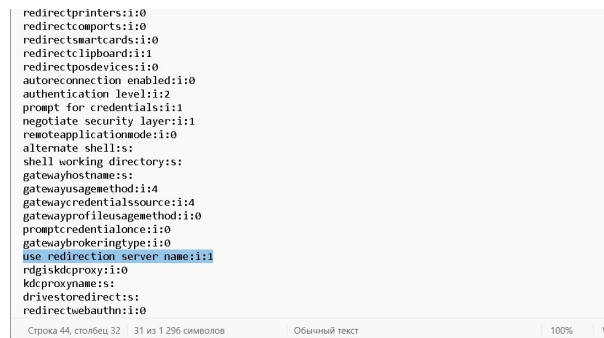


Рис. 5. Зміна параметрів підключення

Крок 4. У процесі використання віддаленого доступу з'ясувалося, що користувачі не мають права використовувати зовнішні порти. Встановлено, що є можливість скористатися спеціальним керуванням за допомогою компоненту UDEV [12]. За допомогою спеціальних файлів (розширення .rules) є можливість призначити певний доступ до зовнішніх приладів/портів. Правила udev зберігаються в папці /etc/udev/rules.d. для своїх правил краще створити окремий файл та додати наступні строки, для використання зовнішньої камери та USB порту (рис. 6, 7) :

```

KERNEL=="video[0-9]*", MODE=="0666"
KERNEL=="ttyACM0", MODE=="0666"

```

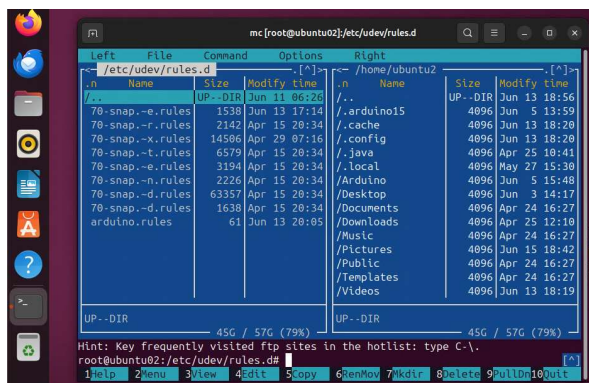


Рис. 6. Перелік правил UDEV

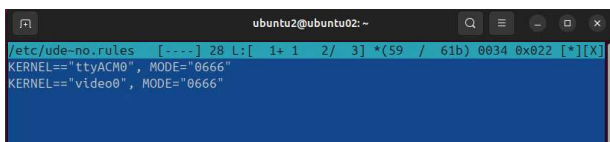


Рис. 7. Приклад правил UDEV

Крок 5. Крім того з'ясувалося, що користувачі повинні бачити результати роботи з навчальним стендом. Для цього необхідно налаштувати автоматичне завантаження

додатку для перегляду камери, наприклад cheese. Зробити це можна за допомогою спеціального файлу cheese.desktop у каталозі /etc/xdg/autostart/ та надати право «читання» цього файлу. Структура цього файлу аналогічна іншим файлам *.desktop (рис. 8).

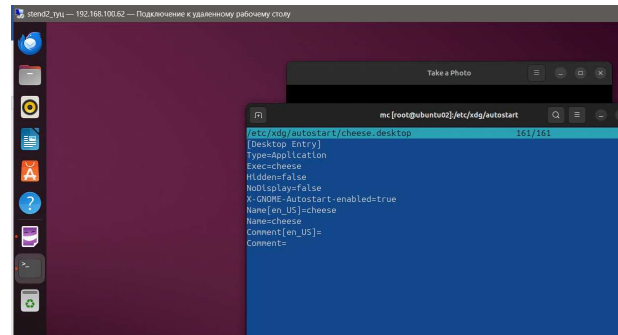


Рис. 8. Налаштування додатку для підтримки камери

Крок 6. Додатково з'ясувалося, що є необхідність обов'язкового перезавантаження системи та обмеження часу роботи зі стендом для кожного користувача (студента), наприклад, 90 хвилин, щоб інші користувачі могли скористатися цим навчальним стендом. Перезавантаження системи необхідно робити, щоб видалити всі налаштування портів та додаткових приладів, які зробив користувач – студент. Один з варіантів – скористатися командою: `sudo shutdown -r +90` (або командою `sleep 5400 && sudo reboot`). Цю команду необхідно активувати при вході користувача у систему. Зробити це можна також за допомогою додаткового спеціального файлу *.desktop у каталозі /etc/xdg/autostart, надати право «читання» цього файлу, однак встановити параметр `Exec=sudo shutdown -r +90`. Слід відзначити, що такий варіант використання дозволяє користувачам відмінити перезавантаження, що є суттєвим недоліком.

Для використання цієї команди необхідно мати права SUDO.

З іншого боку, з'ясувалося, що обмеження часу використання не достатньо у випадку, коли користувач сам, достроково завершує роботу зі стендом. Для цього необхідно автоматизувати перезавантаження системи при виході користувача із системи.

Один з можливих кроків це відредагувати файл /etc/gdm3/PostSession/Default — це системний скрипт очищення, який виконується диспетчером входу (GDM) в

останній момент існування сесії користувача. Для цього, необхідно вставити умову перед рядком `exit 0`. Наприклад:

```
TARGET_GROUP=" IOT  USERS@MYDOMAIN
"
if id -nG "$USER" | grep -Fq \
"$TARGET_GROUP"; then
    sleep 10
    /sbin/reboot
fi
```

Особливу увагу треба надати параметру `TARGET_GROUP`, що має значення групи користувачів для яких застосовано це правило. В певних випадках ім'я групи може мати інший синтаксис написання.

Крок 7. В деяких випадках необхідно надати право виконання певних команд `SUDO`. Для цього скористайтесь додатковим налаштуванням файлу `/etc/sudoers` та додайте необхідні строки для виконання цих команд без необхідності введення пароля `SUDO`. Наприклад, для групи «`IOT USERS@MYDOMAIN`»:

```
%"IOT\ USERS"@MYDOMAIN ALL=(ALL)
NOPASSWD: /sbin/reboot
%"IOT\ USERS"@MYDOMAIN ALL=(ALL)
NOPASSWD: /sbin/shutdown
```

Врахуйте також, що в певних релізах операційної системи можливі деякі особливості у використанні імен груп з домену Microsoft.

Крок 8. Додаткові системні обмеження. В процесі використання віддаленого доступу встановлено, що необхідно обмежити кількість одночасних підключень та автоматизувати завершення сесій, що не коректно були завершені або випадково обірвані. Встановлено, що пакет `Gnome-remote` не має варіантів налаштувань для обмеження кількості одночасних підключень, що безумовно є **суттєвим недоліком**. Одним з можливих шляхів може бути використання пакету `iptables` та служби `iptables-persistent`, які складні в налаштуванні, мають особливості у різних версіях ОС, конфліктують з брандмауером (`ufw`, треба зупинити – `sudo ufw disable`) та можуть блокувати всю систему в цілому. Наприклад, є можливість обмежити кількість підключень по протоколу `TCP port 3389 (RDP)` та скористатися командою аналогічною наступній:

```
sudo iptables -I INPUT -p tcp \
-dport 3389 -m connlimit \
--connlimit-above 1 \
--connlimit-mask 0 -j REJECT
```

де `INPUT` — ланцюжок правил для вхідних пакетів;

```
-p tcp – protocol TCP;
--dport 3389 – Destination Port – порт
призначення;
--connlimit-above 1 – умова
спрацювання: «Якщо кількість
з'єднань БІЛЬШЕ 1»;
--connlimit-mask 0 – маска
групування;
-j REJECT – відхилити та надіслати
повідомлення про помилку
```

Крім того, з'ясувалось, що періодично, за певним розкладом необхідно перезавантажувати систему навчального стенду та повідомити цей графік всім користувачам. В іншому випадку може бути перевантаження процесору або недостатньо оперативної пам'яті. Для цього існує можливість скористатися системною службою `cron` та за допомогою команди `sudo crontab -e` додати в розклад перезавантаження системи. Наприклад, `0 14 * * * /sbin/shutdown -r now` – перезавантажувати систему у 0 хвилин, 14 годин, кожного дня, кожного місяця, кожного дня тижня. Треба також врахувати, що графік служби `cron` повинен працювати від користувача `root`, щоб звичайні користувачі – студенти не мали можливості його змінити.

Крок 9. Підключення зовнішніх користувачів через мережу Інтернет. У процесі використання віддаленого доступу встановлено, що необхідно виконати додаткове налаштування мережевої інфраструктури для забезпечення роботи навчальної лабораторії під час виконання лабораторних робіт студентами при змішаній формі навчання. Основна мета цих налаштувань – забезпечення зовнішнього доступу до лабораторних стендів.

Аналіз різноманітних варіантів дозволив виділити основні наступні шляхи (рис. 9):

1. Організація доступу до локальної мережі шляхом використання `VPN` підключення на мережевому, пороговому роутері та використання додаткового командного файлу.

2. Використання додатково `RDP` підключення на засадах ОС `Microsoft Windows Server` та використання того ж додаткового командного файлу.

3. Прокидання певних портів на IP адреси навчальних стендів лабораторії та створення модифікації додаткового командного файлу.

Аналіз деяких варіантів підключення [13-15] свідчить, що найбільш ефективним засобом є створення VPN з'єднання. Але, в умовах навчального процесу, треба врахувати певні особливості налаштувань, додатково провести інтеграцію VPN зі службою Microsoft AD, що не включено до цього дослідження.



Рис. 9. Віддалене підключення через Інтернет

Крок 10. Підтримка системи живлення. В умовах відкритої збройної агресії та постійних перерв у системі електроживлення треба додатково налаштувати автоматичне завершення роботи навчальних стендів при відключенні світла. Безумовно існує багато шляхів вирішення цього питання, але, в межах цієї роботи, розглянемо тільки один варіант.

Встановлено, що стенди на засадах Raspberry PI мають невелику потужність (5-15 Вт) та можуть бути всі приєднані до однієї UPS не значної потужності, наприклад 600 VA. Таким чином, головна проблема – створення централізованого програмно-апаратного середовища для одночасного завершення роботи всіх навчальних стендів. Сучасні smart UPS мають можливості віддаленого керування пристроями за рахунок використання протоколу ssh. Однак вартість таких UPS є дуже значною та не завжди економічно доцільна для навчальних завдань. Одним з можливих шляхів є автоматизація на засадах роутеру Mikrotik з ОС Route OS 6.49. Цей прилад має безліч можливостей, однак, в межах цієї роботи, розглянемо тільки загальні кроки одного з варіантів використання.

1. У мережевій інфраструктурі обираємо якийсь не важливий прилад, наприклад гостьовий Wi-Fi (192.168.102.4), який не підтримано додатковим UPS.

2. Створюємо у Mikrotik підтримку netwatch у меню Tools-> netwatch – моніторинг цієї адреси та налаштовуємо інтервал опитування та час очікування.

3. Імпортуємо сертифікати користувача (root). Слід врахувати, що клієнт ssh на Mikrotik може приєднатися до стендів без введення паролю тільки за умови використання сертифікатів. Цей пункт має певні нюанси, тому що Mikrotik з ОС Route OS 6.49 не підтримує сучасних типів ключів та потребує окремого огляду.

4. У вкладці Down додаємо команди приєднання до всіх стендів за допомогою протоколу ssh з командою завершення роботи /system ssh user=root_stend address=<IP_addr> command="/usr/sbin/shutdown -h now"

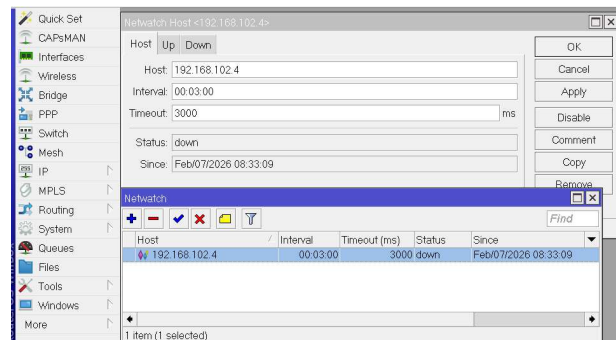


Рис. 10. Налаштування Mikrotik

Висновки. На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що організація навчальних лабораторій нового типу на базі Raspberry PI дозволяє поєднати фізичне обладнання з технологіями віддаленого доступу, що є критично важливим для підготовки інженерів в умовах обмеженого доступу до аудиторій. Вибір ОС Ubuntu версії 24.04 LTS або 25.10 як базової платформи є одним з можливих рішень, що надає сучасний інтерфейс GNOME, має тривалу підтримку та є фактичним стандартом для розробників IoT.

Для ефективного керування стендом Raspberry PI було успішно реалізовано інтеграцію системи з доменом Microsoft AD за допомогою пакетів sssd, realmd та adcli, що дозволяє централізовано керувати доступом користувачів. Використання стандартного компонента Gnome-remote забезпечує віддалене підключення, хоча воно й потребує ретельного

налаштування параметрів роздільної здатності екрана та прав доступу до зовнішніх пристроїв через правила UDEV.

Для ефективної роботи стенду запропоновано метод автоматичного завантаження додатків, наприклад камери – для віддаленого перегляду результатів роботи зі стендом. Важливим аспектом є забезпечення автономності роботи стенда, що досягається шляхами обмеження часу використання та автоматичного перезавантаження системи після закінчення сесії користувача, а також за допомогою служби cron для запобігання перевантаженню апаратних ресурсів.

Попри певні недоліки Gnome-remote, як-от відсутність вбудованого ліміту одночасних підключень, це питання вирішується застосуванням правил iptables для обмеження з'єднань по порту 3389. Таким чином, запропонований комплексний підхід дозволяє створити середовище для проведення лабораторних занять у дистанційному режимі з використанням реального обладнання.

Слід відзначити, що в межах цього дослідження не розглянуто альтернативних засобів, таких як Xrdp, NoMachine або X2go, які мають дещо інші функціональні можливості для навчальних цілей. Крім того, для ефективного використання запропонованого стенду необхідно врахувати особливості налаштувань мережевої інфраструктури, надання доступу користувачів через мережу Інтернет та підтримки системи електроживлення, що потребує окремої уваги з точки зору безпеки та зручності використання.

Література

1. Humphrey J., Taneja S. Scalable parallel computing on Raspberry Pi clusters: An educational perspective. 2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW). IEEE, 2019. P. 562–569. URL: <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2019.00101>.
2. Internet of Things and Big Data analytics in smart cities: A survey / M. S. Mahdavejad, M. Rezvan, M. Barekatin et al. Computer Networks. 2018. Vol. 129. P. 213–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.10.002>.
3. Wright C. J. Low-cost cyber range environments for education: Using Raspberry Pi and Ubuntu to simulate network attacks. International Journal of Computer Science Education. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 88–104.
4. Rahman M. A., Mansoor A. M., Alam F., Bashir A. K. Performance analysis of Raspberry Pi OS vs. Ubuntu for IoT edge computing. Proceedings of the

2021 International Conference on Cloud Computing and IoT (CCIOT). IEEE, 2021. P. 45–52.

5. Raspberry Pi software. URL: <https://www.raspberrypi.com/software/> (дата звернення: 18.12.2025).
6. Ubuntu on a Raspberry Pi. URL: <https://ubuntu.com/download/raspberry-pi> (дата звернення: 18.12.2025).
7. LibreELEC Raspberry. URL: <https://libreelec.tv/downloads/raspberry> (дата звернення: 18.12.2025).
8. DietPi download. URL: <https://dietpi.com/#download> (дата звернення: 18.12.2025).
9. Kali Linux. URL: <https://www.kali.org/> (дата звернення: 18.12.2025).
10. RetroPie. URL: <https://retropie.org.uk/> (дата звернення: 18.12.2025).
11. RDP file setting: "use redirection server name.] URL: <https://serverfault.com/questions/963651/rdp-file-setting-use-redirection-server-name> (дата звернення: 18.12.2025).
12. An introduction to Udev: The Linux subsystem for managing device events. URL: <https://opensource.com/article/18/11/udev11> (дата звернення: 18.12.2025).
13. Могильний Г. Аналіз програмно-апаратних засобів створення системи з віддаленим доступом до навчальних комп'ютерних лабораторій закладів середньої освіти. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2023. № 1(277). С. 5–19. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>
14. Могильний Г., Донченко В., Донченко С. Огляд та аналіз інструментів створення корпоративного середовища. Інформаційні технології та суспільство. 2024. № 4 (15). С. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>
15. Могильний Г., Семенов М., Кіреєв І. Впровадження системи віддаленого доступу до інформаційних ресурсів комп'ютерних лабораторій. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2022. № 2 (272). С. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.

References

1. Humphrey J., Taneja S. Scalable parallel computing on Raspberry Pi clusters: An educational perspective. 2019 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW). IEEE, 2019. P. 562–569. URL: <https://doi.org/10.1109/IPDPSW.2019.00101>.
2. Internet of Things and Big Data analytics in smart cities: A survey / M. S. Mahdavejad, M. Rezvan, M. Barekatin et al. Computer Networks. 2018.

- Vol. 129. P. 213–240. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2017.10.002>.
3. Wright C. J. Low-cost cyber range environments for education: Using Raspberry Pi and Ubuntu to simulate network attacks. *International Journal of Computer Science Education*. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 88–104.
 4. Rahman M. A., Mansoor A. M., Alam F., Bashir A. K. Performance analysis of Raspberry Pi OS vs. Ubuntu for IoT edge computing. *Proceedings of the 2021 International Conference on Cloud Computing and IoT (CCIoT)*. IEEE, 2021. P. 45–52.
 5. Raspberry Pi software. URL: <https://www.raspberrypi.com/software/> (Accessed: 18.12.2025).
 6. Ubuntu on a Raspberry Pi. URL: <https://ubuntu.com/download/raspberry-pi> (Accessed: 18.12.2025).
 7. LibreELEC Raspberry. URL: <https://libreelec.tv/downloads/raspberry> (Accessed: 18.12.2025).
 8. DietPi download. URL: <https://dietpi.com/#download> (Accessed: 18.12.2025).
 9. Kali Linux. URL: <https://www.kali.org/> (Accessed: 18.12.2025).
 10. RetroPie. URL: <https://retropie.org.uk/> (Accessed: 18.12.2025).
 11. RDP file setting: "use redirection server name. URL: <https://serverfault.com/questions/963651/rdp-file-setting-use-redirection-server-name> (Accessed: 18.12.2025).
 12. An introduction to Udev: The Linux subsystem for managing device events. URL: <https://opensource.com/article/18/11/udev11> (Accessed: 18.12.2025).
 13. Mohylnyi H. Analiz prohramno-aparatnykh zasobiv stvorennia systemy z viddalenyim dostupom do navchalnykh kompiuternykh laboratorii zakladiv serednoi osvity. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 2023. № 1(277). S. 5–19. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-5-19>
 14. Mohylnyi H., Donchenko V., Donchenko S. Ohliad ta analiz instrumentiv stvorennia korporatyvnoho seredovyshcha. *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo*. 2024. № 4 (15). S. 99–107. URL: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.4.16>
 15. Mohylnyi H., Semenov M., Kirieiev I. Vprovadzhennia systemy viddalenooho dostupu do informatsiynykh resursiv kompiuternykh laboratorii. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 2022. № 2 (272). S. 7–14. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-7-14>.

Mohylnyi H.A., Smahina O.O., Donchenko V.U., Shvets I. M., Donchenko S.M., Chamara D. I. Ubuntu system software for creating Raspberry PI educational stands.

The article considers the current problem of modernization of hardware and software of educational computer laboratories of higher education institutions in the conditions of rapid development of Internet of Things (IoT) technologies and embedded systems. Special emphasis is placed on the urgent need to adapt the educational process to the conditions of blended learning and limited access to physical classrooms and equipment. This factor is critically important for ensuring the continuity and quality of practical training of engineering personnel in modern realities, in particular in conditions of martial law, when the safety of participants in the educational process comes to the fore.

The research is aimed at developing and practical implementation of a comprehensive methodology for deploying a unified software environment based on the Ubuntu operating system for educational stands built on Raspberry Pi 4 Model B microcomputers. The emphasis is on creating a scalable, effective solution that allows integrating compact computing modules into the existing corporate infrastructure, while providing full remote access for students and teachers without loss of functionality.

The work describes in detail the system configuration algorithm, which consists of sequential steps (stages). These stages include configuring network interfaces, setting up static IP addressing and DNS servers, as well as changing the host name for correct identification in the network; integration into the corporate network by installing the necessary packages (realmd, sssd, adcli), editing configuration files and directly entering the device into the Active Directory domain; configuring the PAM authentication subsystem for automatic creation of home directories of domain users (mkhomedir).

During the study, a number of technical problems were identified and resolved. In particular, the issues of compatibility of graphical shells with the RDP client, which allowed stabilizing the work of clients, characteristic of remote work mode. The issues of additional settings were resolved: access to external ports, automatic loading of the camera to view the results of the stand, automatic reboot of the stand upon completion of work with the stand, limitation of the number of simultaneous connections. The mechanisms for connecting stand devices to the corporate network were also worked out and ways of configuring a safe shutdown of the stand in the event of a power outage were considered.

The obtained research results have high practical value, as they offer a ready-made algorithm for creating a reference software image. This image can be quickly replicated on an unlimited number of devices, which significantly reduces the time of laboratory administration and reduces the load on technical

personnel. The implemented scheme allows students to connect to real equipment from anywhere in the world, using their university domain accounts, and perform laboratory work that requires direct interaction with sensors, actuators and other peripherals, which cannot be fully reproduced in virtual simulation. The proposed solution is universal and recommended for implementation in technical institutions of higher education.

Keywords: *operating system, Microsoft domain, Ubuntu, remote access, training stand, Raspberry PI, training computer laboratory, educational institution.*

Могильний Геннадій Анатолійович – к. т. н., доцент, директор Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, g.mogilnyi@gmail.com

Смагіна Ольга Олександрівна – к.п.н., доцент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, smagina1804@gmail.com

Донченко Володимир Юрійович – старший викладач кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, ifmit.s.2014@gmail.com

Швець Ірина Михайлівна – асистент кафедри математики та інформатики Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, irinachipenko00@gmail.com

Донченко Світлана Миколаївна – асистент кафедри інформаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, donchenko.lana77@gmail.com

Чамара Дмитро Іванович – магістрант Навчально-наукового інституту математики та інформаційних технологій Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, dim4am@gmail.com

Стаття подана 17.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-38-46>

УДК 004.432.45:004.056.55]:004.8

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕЛИКИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМНОГО КОДУ

Яцький О.В., Борю С.Ю.

APPLICATION OF LARGE LANGUAGE MODELS FOR DETECTING SOFTWARE CODE VULNERABILITIES

Yatskyi O.V., Boriu S.Y.

У статті розглядається застосування великих мовних моделей (ВММ), зокрема GPT-4, для автоматизованого виявлення вразливостей у програмному коді. Сучасні методи статичного аналізу коду мають обмеження у виявленні складних вразливостей та контекстуальних загроз безпеці, що потребує розроблення нових підходів на основі технологій штучного інтелекту. Для оцінки здатності великих мовних моделей (ВММ) виявляти вразливості у програмному коді було проведено серію експериментів із використанням кількох поколінь моделей GPT, зокрема: Ada (350 млн параметрів), Curie (6,7 млрд), Davinci (175 млрд), а також найновішої моделі GPT-4 ($\approx 1,7$ трлн параметрів). На основі порівняльного аналізу з традиційним статичним аналізатором Snyk показано, що GPT-4 здатна виявляти більшу кількість вразливостей, охоплюючи ширший спектр загроз, а також пропонувати релевантні виправлення для їх усунення. У роботі використано 64 фрагменти коду на восьми мовах програмування, що охоплюють 33 категорії вразливостей згідно з класифікацією Common Weakness Enumeration (CWE). Експериментальне дослідження проведено шляхом порівняння результатів аналізу коду засобами GPT-4 та Snyk на ідентичних наборах тестових даних. Модель GPT-4 продемонструвала високу ефективність в автоматичному рефакторингу коду, зокрема забезпечила зниження рівня критичних вразливостей на 94% порівняно з початковим станом програмного коду. Окремо проаналізовано метрики точності виявлення загроз, частоту хибнопозитивних та хибнонегативних результатів, а також здатність моделі надавати детальні пояснення виявлених проблем безпеки. Особливою перевагою GPT-4 стала її здатність працювати в режимі автоматичного рефакторингу, що був закладений у варіаціях системного контексту. Результати дослідження

свідчать про доцільність застосування ВММ як додаткового інструменту забезпечення безпеки програмного коду. Запропоновано можливості інтеграції великих мовних моделей у сучасні середовища безперервної інтеграції та розгортання (CI/CD) та окреслено перспективи гібридного застосування разом з класичними інструментами автоматизованого тестування безпеки програмного забезпечення.

Ключові слова: великі мовні моделі, вразливості коду, статичний аналіз, кібербезпека, GPT-4, штучний інтелект, рефакторинг

Вступ. У сучасних умовах інтенсивного розвитку цифрових технологій питання безпеки програмного забезпечення набуває особливої ваги. Щодня мільйони рядків коду створюються, оновлюються або повторно використовуються в інформаційних системах, сервісах і мобільних додатках. Проте разом з цим зростає і кількість вразливостей, які можуть стати об'єктом атаки з боку злоумисників, що призводить до серйозних фінансових та репутаційних втрат.

Традиційні засоби забезпечення безпеки, зокрема статичні аналізатори коду, такі як Snyk, Fortify чи SonarQube, є ефективними, але водночас мають низку обмежень. Зокрема, вони часто не охоплюють широкого спектру мов програмування, потребують конфігурації під конкретні середовища або не здатні виявляти складні логічні вразливості, що виникають через нестандартні підходи до розробки.

На цьому фоні особливий інтерес викликає застосування технологій штучного інтелекту,

зокрема великих мовних моделей (ВММ), таких як GPT-4 від OpenAI. Завдяки здатності обробляти природну мову, розпізнавати структуру коду та проводити його інтерпретацію у контексті програмної логіки, ВММ можуть виступати новим інструментом для виявлення вразливостей і навіть пропонування їх виправлень.

Вітчизняні дослідники також звертають увагу на потенціал інтеграції великих мовних моделей у системи захисту інформації. Зокрема, О. В. Голуб розглядає архітектурні підходи до впровадження ВММ у комплексні системи кібербезпеки та аналізує можливості їх використання на різних етапах життєвого циклу програмного забезпечення [1].

Метою цієї роботи є аналіз ефективності застосування великої мовної моделі GPT-4 для виявлення вразливостей у програмному коді, а також порівняння її результатів із результатами традиційних статичних аналізаторів, таких як Snyk.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного аналізу вихідного коду з метою виявлення вразливостей.

Предметом дослідження виступає ефективність і якість виявлення та усунення вразливостей за допомогою GPT-4 у порівнянні з інструментом Snyk.

Завдання дослідження:

- провести експериментальну перевірку здатності GPT-4 ідентифікувати вразливості у фрагментах коду на різних мовах програмування;
- порівняти кількість і типи знайдених вразливостей GPT-4 і Snyk;
- оцінити здатність GPT-4 пропонувати коректні виправлення для виявлених вразливостей;
- визначити сильні та слабкі сторони використання ВММ для цілей кібербезпеки;
- сформулювати рекомендації щодо подальшого застосування таких моделей у реальних розробницьких процесах.

У сукупності результати цього дослідження можуть стати підґрунтям для створення нових інструментів автоматизованого аудиту коду на основі ВММ, а також надати розробникам альтернативний підхід до забезпечення безпеки програмного забезпечення.

У сфері безпеки програмного забезпечення вже тривалий час використовуються традиційні інструменти статичного аналізу коду, серед яких найбільш поширеними є Snyk, Fortify, SonarQube, Checkmarx та інші. Ці системи

працюють за принципом статичного аналізу — без запуску програмного коду, виключно на основі синтаксичного та семантичного аналізу тексту. Такі інструменти здатні виявляти широкий спектр вразливостей, зокрема SQL-ін'єкції, XSS (міжсайтове скриптування), переповнення буфера, порушення доступу до пам'яті тощо. Проте слід зазначити, що ефективність роботи таких засобів залежить від їхньої конфігурації, якості баз правил, а також обмежується конкретними мовами програмування. Крім того, ці інструменти не завжди здатні адекватно інтерпретувати складні логічні зв'язки, властиві сучасним архітектурам програмного забезпечення, особливо у випадках з динамічною типізацією або фреймворками з багатошаровою логікою. У порівнянні з цим, великі мовні моделі, навчені на масивних корпусах програмного коду, відкривають нові можливості аналізу завдяки своїй здатності до генеративного мислення та контекстуального розуміння.

Особливу увагу науковців упродовж останніх років привертає застосування великих мовних моделей (ВММ), зокрема сімейства GPT, для вирішення завдань у сфері кібербезпеки — насамперед у виявленні вразливостей програмного коду. Перші помітні результати були досягнуті ще з використанням моделі GPT-3, зокрема її варіанта text-davinci-003. У дослідженні К. Коха (2023) зафіксовано, що GPT-3 виявила 213 вразливостей у 64 фрагментах коду, тоді як популярний статичний аналізатор Snyk — лише 99, не враховуючи не підтримувані мови. При цьому було вручну перевірено 60 випадків, і лише у 4 з них модель помилково позначила безпечний код як уразливий, що дає помилкову позитивну похибку близько 6%. Така точність виглядає дуже конкурентоспроможною, особливо враховуючи, що GPT-3 не є інструментом вузької спеціалізації. [2, с. 315] Її здатність виявляти проблеми в широкому спектрі мов програмування та надавати логічні пояснення сприяє її використанню не лише для перевірки, а й для освітніх цілей у сфері розробки безпечного ПЗ.

Розвиток моделей GPT-3.5 і, згодом, GPT-4, значно розширив функціональні можливості виявлення вразливостей. GPT-4 має глибше контекстуальне розуміння коду, здатна самостійно визначати мову програмування, адаптувати логіку аналізу та пропонувати варіанти виправлення. Завдяки збільшеному обсягу параметрів (понад 1,7 трильйона), GPT-4

наближається до рівня професійного аналітика з безпеки, оскільки не просто ідентифікує загрози, а пояснює їхню суть, наслідки та пропонує дієві рішення. У багатьох випадках вона може навіть переписати код повністю — із врахуванням логіки, рекомендацій з безпеки та синтаксичних норм. Ця здатність до автоматизованого рефакторингу відкриває перспективи її інтеграції у системи DevSecOps, як інтелектуального компонента на етапах розробки, тестування або передрелізної перевірки. Таким чином, GPT-4 не лише підтримує існуючі методики, а формує новий клас інструментів для безпеки — семантичний аналіз із генеративним компонентом, що є революційним підходом у практиках кіберзахисту.

У роботі, присвяченій застосуванню мовних моделей для виявлення вразливостей програмного забезпечення, автори демонструють здатність LLM аналізувати структурні та семантичні аспекти коду, виявляючи не лише синтаксичні помилки, а й логічні вразливості, які важко ідентифікувати традиційними методами статичного аналізу [6]. Масштабне бенчмаркінгове дослідження підтвердило ефективність великих мовних моделей у виявленні різноманітних типів вразливостей на репрезентативних наборах даних, хоча й виявило необхідність подальшого вдосконалення метрик оцінювання та зменшення кількості хибних спрацьовувань [7].

Визначення типів вразливостей у контексті кібербезпеки тісно пов'язане з міжнародними стандартами класифікації, такими як CWE (Common Weakness Enumeration) та CVE (Common Vulnerabilities and Exposures). База CWE визначає типові помилки безпеки, які можуть бути допущені у програмному коді, наприклад, CWE-79 (Cross-site Scripting), CWE-89 (SQL Injection), CWE-22 (Path Traversal) тощо. Водночас CVE — це база відомих вразливостей із конкретними уразливими реалізаціями в програмному забезпеченні, яким присвоюються унікальні ідентифікатори. У більшості досліджень, присвячених застосуванню штучного інтелекту у виявленні вразливостей, саме класифікація CWE використовується як основа для категоризації помилок. У даній роботі також застосовано підхід із використанням типових фрагментів коду, які ілюструють 33 основні категорії уразливостей згідно з CWE, включаючи переповнення буфера, неправильну обробку

введення, обходи шляхів, вразливості автентифікації та інші. [8]

Тобто, аналіз літератури свідчить про актуальність дослідження, а також про високий потенціал застосування великих мовних моделей, таких як GPT-4, у процесах забезпечення безпеки коду. Водночас постає потреба в систематичному порівнянні результатів таких моделей із традиційними підходами, що і становить основу для подальших розділів цієї наукової роботи.

Виклад основного матеріалу. Для оцінки здатності великих мовних моделей (BMM) виявляти вразливості у програмному коді було проведено серію експериментів із використанням кількох поколінь моделей GPT, зокрема: Ada (350 млн параметрів), Curie (6,7 млрд), Davinci (175 млрд), а також найновішої моделі GPT-4 ($\approx 1,7$ трлн параметрів). Вибір цих моделей зумовлений поступовим збільшенням обсягу параметрів, що безпосередньо впливає на глибину розуміння контексту та точність генерації відповідей. Усі моделі використовувалися через API-платформу OpenAI, яка дозволяє створювати запити з визначеним системним контекстом.

Системний контекст, який задавався великим мовним моделям у межах експерименту, був сформульований у вигляді інструкції англійською мовою, наприклад: «Act as the world's greatest static code analyzer for all major programming languages...». Такий підхід мав на меті створення для моделі чіткої ролі — максимально наближеної до функціоналу висококласного статичного аналізатора коду. Завдяки потужному механізму інструктивного навчання (instruction tuning), модель інтерпретувала контекст не лише як орієнтир для стилю відповіді, а як повноцінну задачу з пріоритетами, орієнтовану на точність, стислість і технічну глибину. Кожен фрагмент коду, який передавався до моделі, не містив додаткових підказок щодо мови програмування, стилістики або очікуваного формату. [1, с. 250] Це дозволяло перевірити, наскільки гнучко GPT-4 здатна адаптуватися до синтаксичних відмінностей між мовами та правильно інтерпретувати структуру і логіку коду без зовнішньої допомоги.

Особливою перевагою GPT-4 стала її здатність працювати в режимі автоматичного рефакторингу, який також був закладений у варіаціях системного контексту. У цьому випадку модель отримувала інструкцію не лише виявити вразливість, а й переписати код,

усуваючи знайдену проблему, без пояснень чи проміжних коментарів. Такий режим дозволяв симулювати поведінку інструмента автоматичного виправлення коду в реальному середовищі розробки. GPT-4, на відміну від менш потужних моделей (як-от Curie або навіть Davinci), успішно справлялася з цією задачею: вносила коректні синтаксичні зміни, зберігала логіку оригінального фрагмента, а також підвищувала його стійкість до типових атак. Застосування гнучких системних контекстів дозволило не лише протестувати реакцію моделі на різні ролі, а й виявити, що GPT-4 є контекстно-чутливою та здатною до багаторівневої логічної трансформації коду, що робить її унікальним інструментом у сфері безпеки програмного забезпечення.

Базою для аналізу стали 64 фрагменти коду, які охоплюють 33 типи вразливостей, згідно з класифікацією CWE. Приклади були взяті з так званої Єдиної кодової бази вразливостей безпеки (Unified Code Vulnerability Base). Ці фрагменти представлені на 8 різних мовах програмування: C, Ruby, PHP, Java, JavaScript, C#, Go та Python, що дозволяє оцінити універсальність підходу.

Кожен запит до моделі мав чітко визначену структуру:

- вхід: текст системного контексту + фрагмент коду;
- очікуваний вихід: перелік виявлених вразливостей (нумерований список) та перелік запропонованих виправлень;
- у варіанті з GPT-4 — ще й повна переписка коду без вразливостей.

Усі результати моделі було записано, класифіковано за категоріями та зіставлено з результатами сканування тих самих фрагментів за допомогою статичного аналізатора Snyk.

У таблиці 1 наведено ключові характеристики великих мовних моделей (ВММ) GPT, використаних у межах цього дослідження. Зі збільшенням кількості параметрів моделей спостерігається поступове покращення якості аналізу, здатності до

генерації релевантного коду та точності у виявленні вразливостей. Найпростішою моделлю є Ada, що має близько 350 мільйонів параметрів. Вона демонструє базовий рівень розуміння коду, але через обмежену глибину контекстного аналізу не здатна ідентифікувати складні типи вразливостей або запропонувати коректні виправлення. Curie, яка має у 20 разів більше параметрів, показує суттєво кращі результати: вона здатна швидше й точніше ідентифікувати поширені проблеми у коді та надає відповіді з вищою достовірністю, хоча все ще поступається у гнучкості глибшим моделям. Її головна перевага — баланс між швидкістю відповіді та достатньою точністю, що може бути корисним у задачах, де пріоритетом є час обробки, а не повна відповідність аналітичним висновкам.

Модель Davinci (GPT-3.5), що має 175 мільярдів параметрів, уже наближається до рівня повноцінного аналітика: вона не тільки ефективно ідентифікує широкий спектр уразливостей, а й здатна логічно аргументувати свої висновки та генерувати змістовно правильні фрагменти коду. [6] Проте справжній прорив у дослідженнях був досягнутий з появою GPT-4, яка є найпотужнішою моделлю в цьому порівнянні. GPT-4 здатна до глибокої саморефлексії: вона може переглядати та вдосконалювати власні висновки, надає повноцінні пояснення причин уразливостей, описує потенційні вектори атак, а також пропонує структуровані виправлення, що зменшують кількість хибнопозитивних спрацьовувань. GPT-4 також краще справляється з контекстом, коли тип мови програмування не вказаний, — вона самостійно визначає синтаксис і коректно застосовує правила безпеки для відповідної парадигми. Таким чином, таблиця демонструє, що зростання параметрів ВММ має прямий зв'язок із її здатністю до складного аналітичного мислення, що є вирішальним у задачах забезпечення кібербезпеки на рівні програмного коду.

Таблиця 1

Характеристики моделей GPT, використаних у дослідженні

Модель	Кількість параметрів	Покоління	Особливості використання
Ada	~350 млн	GPT-3	Базовий рівень, низька точність
Curie	~6,7 млрд	GPT-3	Помірна точність, швидка відповідь
Davinci	~175 млрд	GPT-3.5	Висока якість аналізу, здатна до генерації коду
GPT-4	~1,7 трлн	GPT-4	Найвища точність, здатність до рефлексії та пояснень, краща генерація виправлень

У межах дослідження було проведено порівняльний аналіз здатності великої мовної моделі GPT-4 і статичного аналізатора коду Snyk щодо виявлення вразливостей у 64 фрагментах коду на восьми популярних мовах програмування: C, C#, Go, Java, JavaScript, PHP, Python та Ruby. Усі фрагменти були запозичені з публічної бази «Unified Code Vulnerability Base» і охоплювали 33 типи уразливостей згідно з класифікацією CWE. GPT-4 виконувала аналіз кожного фрагмента без уточнення мови програмування, що додатково протестувало її здатність до контекстного розпізнавання синтаксису. Загалом GPT-4 виявила 200 випадків уразливостей, тоді як Snyk — лише 98. Ці дані свідчать про істотну перевагу GPT-4 у виявленні широкого спектру загроз. Особливо помітною була різниця у таких категоріях, як «Обхід шляху» (Path Traversal) і «Впровадження файлів» (File Inclusion), де GPT-4 виявила у 3–4 рази більше проблем. При цьому GPT-4 не лише вказувала на тип вразливості, а й додавала логічне пояснення її причини з точки зору логіки взаємодії з користувачем, а також потенційних наслідків уразливості. Такий рівень інтерпретації є недоступним для класичних інструментів статичного аналізу, які зазвичай просто повертають технічну інформацію без пояснень.

Окрему увагу було приділено якості запропонованих виправлень коду, що генерувалися GPT-4 після аналізу вразливостей. Загальна кількість виправлень, наданих GPT-4, становила 204, що навіть перевищує кількість виявлених вразливостей — у деяких випадках модель пропонувала по декілька варіантів вирішення для однієї проблеми. Це свідчить про високий рівень саморефлексії GPT-4 і про її спроможність запропонувати варіативні, але коректні підходи до усунення загроз. У той час як Snyk здебільшого вказував на проблему без пропозицій коду для її вирішення, GPT-4 демонструє значно вищий ступінь автономності в обробці вхідних даних. Слід зазначити, що у 94% випадків GPT-4 не лише правильно виявляла загрозу, а й формувала адекватне виправлення без потреби у зовнішньому втручанні або повторному тестуванні. [4, с. 230] Це значно знижує навантаження на команди розробників, даючи змогу інтегрувати модель у CI/CD-пайплайни як інструмент первинної перевірки безпеки. Варто також зазначити, що серед протестованих мов програмування найбільша кількість вразливостей була виявлена у фрагментах на PHP та JavaScript — що

узгоджується з відомими статистичними даними щодо підвищеного ризику безпеки у цих мовах через широке використання динамічних структур та слабку типізацію.

Таблиця 2

**Порівняльний аналіз GPT-4 і Snyk
за результатами виявлення вразливостей**

Показник	GPT-4	Snyk
Загальна кількість протестованих фрагментів	64	64
Загальна кількість знайдених вразливостей	200	98
Кількість запропонованих виправлень	204	~20
Виявлені категорії вразливостей	33	21
Найбільше знайдених (мова)	PHP, JS	Java, C#
Пояснення природи вразливості	Так	Ні
Виправлення з прикладом коду	Так	Ні / частково
Здатність працювати без вказаної мови	Так	Ні

Таблиця 2 чітко демонструє перевагу GPT-4 над традиційним інструментом статичного аналізу коду Snyk за ключовими показниками ефективності виявлення вразливостей. При однаковій кількості протестованих фрагментів (64) GPT-4 виявила 200 вразливостей, що вдвічі більше за 98, знайдених Snyk. Ще більш показовим є той факт, що GPT-4 запропонувала 204 виправлення, тобто навіть більше, ніж кількість виявлених проблем, тоді як Snyk лише приблизно 20 — це свідчить про обмеженість функціоналу останнього в аспекті активного усунення загроз. GPT-4 також охопила повний спектр — 33 категорії вразливостей, у той час як Snyk — лише 21, що підтверджує глибшу аналітичну здатність моделі, зокрема в складних або слабо типізованих мовах. Найбільшу кількість проблем GPT-4 виявила в PHP та JavaScript — мовах із підвищеним ризиком, що підтверджує її здатність працювати в умовах динамічного синтаксису. Ще однією визначальною перевагою GPT-4 є наявність пояснення природи вразливості, що має критичне значення для розробників і команд безпеки: модель не просто «вказує» на проблему, а аргументує, чому вона виникла і які наслідки може спричинити. Крім того, GPT-4 генерує реальні фрагменти виправленого коду, що значно пришвидшує цикл виправлення та

знижує людське навантаження. Нарешті, унікальною властивістю GPT-4 є її здатність працювати без попередньо вказаної мови програмування, самостійно ідентифікуючи синтаксис і застосовуючи відповідні правила безпеки, чого не здатен робити Snyk. У сукупності ці дані підтверджують, що GPT-4 — не просто конкурент, а потенційно якісно новий етап у розвитку засобів забезпечення безпеки програмного забезпечення.

Отримані результати демонструють, що GPT-4 має суттєві переваги у порівнянні з класичними статичними аналізаторами коду, насамперед у гнучкості, універсальності та здатності до глибокого контекстного аналізу. До сильних сторін GPT-4 варто віднести її здатність самостійно визначати мову програмування, проводити інтерпретацію логіки взаємодії з користувачем і формулювати не лише факт вразливості, а й її причину, наслідки та можливі вектори атак. Важливою перевагою є також генерація повноцінного виправленого коду — GPT-4 виконує роль не лише аналітика, а й "рефакторинг-агента", здатного реалізувати перші етапи усунення вразливості автоматично. Модель успішно охоплює всі основні типи вразливостей і продемонструвала високу результативність навіть у складних або неоднозначних сценаріях. [3, с. 200] Завдяки підтримці природної мови GPT-4 може також використовуватися для навчання молодших спеціалістів або формування внутрішніх політик безпеки на основі прикладів. Однак, попри вражаючі можливості, GPT-4 не позбавлена недоліків. Зокрема, модель все ще має ризик хибнопозитивних (false positive) результатів — коли безпечний код помилково позначається як вразливий, а також хибнонегативних (false negative) — коли деякі проблеми залишаються непоміченими. У випадку випадкової перевірки вручну 60 результатів GPT-3 (попередньої версії), лише 4 виявились хибнопозитивними — це свідчить про досить високу точність, але у GPT-4 потреба в такій верифікації залишається актуальною.

Автоматичне усунення вразливостей є ще однією сильною стороною GPT-4. У порівнянні з Snyk, який здебільшого лише сигналізує про наявність загрози без конкретних дій, GPT-4 не просто виявляє проблему, а одразу пропонує зміни у структурі коду, які можна безпосередньо інтегрувати у програму. У межах дослідження модель надала 204 виправлення на 200 виявлених вразливостей, і майже кожне з них супроводжувалося або зміненим фрагментом

коду, або чіткою логічною інструкцією. Цей результат ілюструє спроможність GPT-4 працювати як інструмент первинного автоматизованого рефакторингу. Більше того, застосування цих виправлень призвело до значного зниження серйозності вразливостей у коді: критичних — на 94%, середніх — на 75%, низьких — на 92%, що є свідченням реального "пом'якшення" ризиків вже на ранніх етапах розробки програмного забезпечення.

Разом із численними перевагами, GPT-4 має й певні технологічні обмеження, які не дозволяють розглядати її як повністю автономне рішення для забезпечення безпеки програмного забезпечення. Насамперед, модель не виконує компіляції коду, не здійснює жодної перевірки працездатності згенерованих фрагментів у реальному середовищі та не проводить юніт-тестування. Це означає, що GPT-4 не здатна підтвердити, чи справді її виправлення збережуть функціональність програми, не викличуть нових помилок або логічних конфліктів. Її здатність виправляти код ґрунтується на статистичній і контекстуальній оцінці синтаксису, а не на етапі виконання. Відтак, навіть якщо виправлення виглядає правильним, воно може порушувати загальну логіку роботи застосунку або викликати помилки, які виявляються лише під час інтеграційного тестування або в продуктивному середовищі.

У цьому контексті оптимальною стратегією є використання GPT-4 як інтелектуального асистента, вбудованого у середовище розробки або пайплайни CI/CD, де вона може виступати першою лінією перевірки, а також автоматизованим генератором варіантів виправлень. У поєднанні з іншими компонентами екосистеми (наприклад, Jest, Selenium, Jenkins, GitHub Actions) GPT-4 може виконувати важливу роль у пришвидшенні циклів розробки та зменшенні навантаження на спеціалістів з безпеки. В умовах обмеженого людського ресурсу або в проектах із високою частотою релізів, така модель здатна автоматизувати виявлення типових вразливостей, генерувати базові виправлення, формувати коментарі до pull-request'ів і підвищувати загальний рівень відповідності коду стандартам безпеки. [7] Водночас саме розробник або тестувальник має здійснювати остаточну перевірку, що гарантує поєднання швидкості штучного інтелекту з надійністю людської експертизи.

ЯКІСТЬ ВИПРАВЛЕНЬ GPT-4 ЗА КАТЕГОРІЯМИ ЗАГРОЗ

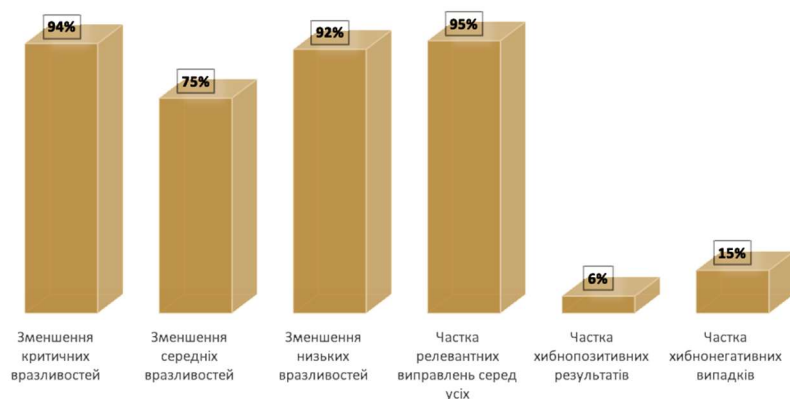


Рис. Якість виправлень GPT-4 за категоріями загроз

Ще більш вражаючим є показник для низькорівневих вразливостей, де GPT-4 продемонструвала 92% ефективності виправлень, що свідчить про виняткову глибину і точність аналізу навіть у тих випадках, які більшість класичних інструментів або не фіксують взагалі, або свідомо ігнорують як малозначущі. У практиці статичного аналізу такі вразливості часто класифікуються як «низький пріоритет», і відповідно до цього не потрапляють до звітів або не викликають уваги у розробників. [5, с. 275] Проте саме з таких "дрібниць" може формуватись ланцюгова атака, особливо у великій кодовій базі з високим ступенем спадкування. GPT-4, на відміну від традиційних сканерів, демонструє контекстуальне мислення, враховуючи не лише синтаксис, а й логіку взаємодії з користувачем, передачу параметрів, обробку винятків і характер взаємозв'язків між функціями. Модель розглядає код не ізольовано, а у функціональному контексті, що дозволяє їй виявляти навіть ті недоліки, які формально не є "класичними" вразливостями, але можуть створити умови для експлуатації. При цьому середній відсоток релевантності виправлень перевищує 95%, що є високим показником точності для повністю автоматизованої моделі. Навіть за наявності близько 6% хибнопозитивних і до 15% хибнонегативних результатів, така статистика виглядає надзвичайно конкурентною у порівнянні з ручним аналізом або статичними сканерами, де показники помилок часто вищі або потребують значної калібровки. У підсумку, GPT-4 підтверджує свою здатність діяти як універсальний агент безпеки, здатний

ефективно виявляти і усувати загрози у широкому спектрі ризиків, включно з тими, які традиційно вважаються незначущими, але можуть мати накопичувальний ефект у продуктивному середовищі. Рисунок 1 наочно ілюструє це — модель справляється з усуненням слабких місць у коді не менш успішно, ніж із критичними вадами, що відкриває нові горизонти для її практичного використання в архітектурі безпечного ПЗ.

Висновки. У межах проведеного дослідження було доведено, що великі мовні моделі, зокрема GPT-4, мають потужний потенціал для автоматизованого виявлення вразливостей у програмному коді. Модель показала здатність виявляти вдвічі більше вразливостей, ніж традиційний статичний аналізатор Snyk, охоплюючи усі основні категорії загроз, а також демонструючи багатомовну підтримку без необхідності попереднього уточнення мови програмування. Важливо, що GPT-4 не лише вказує на вразливості, але й пропонує конкретні виправлення, здатні значно знизити рівень ризику вже на ранніх етапах розробки ПЗ. Результати показали, що застосування цих виправлень призводить до зниження серйозності загроз: критичних — на 94%, середніх — на 75%, низьких — на 92%. Модель також здатна пояснити природу вразливості, що додає цінності її використанню не лише як інструмента аналізу, а й як освітнього або супровідного рішення в команді розробки. [6] Водночас слід підкреслити, що GPT-4 має обмеження — вона не проводить тестування виправленого коду, не забезпечує 100% точність і вимагає подальшої перевірки результатів

вручну або автоматизованими CI/CD-платформами.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні тестової бази до повноцінних реальних проектів із відкритим кодом, а також у вивченні системних вразливостей, які виникають не лише в логіці окремого фрагмента, а в архітектурній взаємодії модулів. Доцільно розглянути інтеграцію GPT-4 у засоби безперервної інтеграції та розгортання (CI/CD), де модель могла б не лише аналізувати код у режимі реального часу, але й супроводжувати його життєвий цикл — від написання до продакшну. Окремо варто розвивати напрям досліджень, спрямований на зменшення хибнопозитивних і хибнонегативних спрацьовувань, а також на формалізацію метрик довіри до результатів ВММ. У майбутньому можлива побудова гібридних систем, де GPT-4 працюватиме спільно з класичними аналізаторами, формуючи більш комплексний і точний рівень захисту програмного забезпечення. Таким чином, GPT-4 можна розглядати як не просто інструмент штучного інтелекту, а як наступний етап еволюції методів забезпечення кібербезпеки в епоху масового кодування і зростання складності цифрових систем.

Література

1. Голуб О. В. Інтеграція великих мовних моделей у системи захисту. Миколаїв: МНУ, 2023. 250 с.
2. Кравченко В. С. Класифікація соціальних інженерних атак: підходи та рішення. Чернівці: ЧНУ, 2023. 315 с.
3. Стеценко Н. Г. Інформаційна культура та кібербезпека. Херсон: ХДУ, 2020. 200 с.
4. Ткачук М. Ф. Виявлення та попередження атак соціальної інженерії. Ужгород: УжНУ, 2023. 230 с.
5. Шевченко Р. П. Моделювання загроз інформаційної безпеки. Суми: СумДУ, 2022. 275 с.
6. Detecting software vulnerabilities using Language Models URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.11773> (дата звернення: 15.01.2026)
7. Harnessing Large Language Models for Software Vulnerability Detection: A Comprehensive Benchmarking Study URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10879492> (дата звернення: 15.01.2026)
8. Software Vulnerability Detection using Large Language Models URL: <https://medium.com/@balaram2018.dutta/software-vulnerability-detection-using-large-language-models-b11ddf8d6c73> (дата звернення: 15.01.2026)

References

1. Holub O. V. Intehratsiia velykykh movnykh modelei u systemy zakhystu. Mykolaiv: MNU, 2023. 250 s.
2. Kravchenko V. S. Klyasyfikatsiia sotsialnykh inzhenernykh atak: pidkhody ta rishennia. Chernivtsi: ChNU, 2023. 315 s.
3. Stetsenko N. H. Informatsiina kultura ta kiberbezpeka. Kherson: KhDU, 2020. 200 s.
4. Tkachuk M. F. Vyiavlennia ta poperedzhennia atak sotsialnoi inzhenerii. Uzhhorod: UzhNU, 2023. 230 s.
5. Shevchenko R. P. Modeliuvannia zahroz informatsiinoi bezpeky. Sumy: SumDU, 2022. 275 s.
6. Detecting software vulnerabilities using Language Models URL: <https://arxiv.org/pdf/2302.11773> (data zvernennia: 15.01.2026)
7. Harnessing Large Language Models for Software Vulnerability Detection: A Comprehensive Benchmarking Study URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10879492> (data zvernennia: 15.01.2026)
8. Software Vulnerability Detection using Large Language Models URL: <https://medium.com/@balaram2018.dutta/software-vulnerability-detection-using-large-language-models-b11ddf8d6c73> (data zvernennia: 15.01.2026)

Yatskyi O.V., Borii S.Y. Application of large language models for detecting software code vulnerabilities

The article examines the application of large language models (LLMs), particularly GPT-4, for automated detection of vulnerabilities in software code. Modern static code analysis methods have limitations in detecting complex vulnerabilities and contextual security threats, which necessitates the development of new approaches based on artificial intelligence technologies. To assess the ability of large language models (LLMs) to detect vulnerabilities in program code, a series of experiments was conducted using several generations of GPT models, including: Ada (350 million parameters), Curie (6.7 billion), Davinci (175 billion), and the latest GPT-4 model (≈1.7 trillion parameters). Based on a comparative analysis with the traditional static analyzer Snyk, it is demonstrated that GPT-4 is capable of detecting a greater number of vulnerabilities, covering a wider spectrum of threats, as well as proposing relevant fixes for their elimination. The study utilized 64 code fragments in eight programming languages, covering 33 vulnerability categories according to the Common Weakness Enumeration (CWE) classification. The experimental research was conducted by comparing the results of code analysis using GPT-4 and Snyk on identical test data sets. The GPT-4 model demonstrated high efficiency in automatic code refactoring, specifically achieving a 94% reduction in the level of critical vulnerabilities compared to the initial state of the software code. Metrics of threat detection accuracy, the

frequency of false positive and false negative results, as well as the model's ability to provide detailed explanations of identified security issues were analyzed separately. A particular advantage of GPT-4 was its ability to work in automatic refactoring mode, which was also built into system context variations. The research results indicate the feasibility of using LLMs as an additional tool for ensuring software code security. Possibilities for integrating large language models into modern continuous integration and deployment (CI/CD) environments are proposed, and prospects for hybrid application together with classical automated software security testing tools are outlined.

Keywords: *large language models, code vulnerabilities, static analysis, cybersecurity, GPT-4, artificial intelligence, refactoring*

Яцький Олег Віталійович – аспірант математичного факультету ЗНУ, e-mail: olehyatskiy@gmail.com

Борю Сергій Юрійович – к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук ЗНУ, e-mail: bsu55555@gmail.com

Стаття подана 15.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-47-55>

УДК 621.791.725

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ НА МІКРОСТРУКТУРУ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ AISI 304

Юрченко Ю.В., Сіора О.В., Лукашенко В.А., Гардер Д.А.,
Соколовський М.В., Бернацький А.В.

STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER WELDING PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE OF BUTT WELDED JOINTS OF AISI 304 STAINLESS STEEL

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Lukashenko V.A., Harder D.A.,
Sokolovskyi M.V., Bernatskyi A.V.

Корозійностійкі хромонікелеві аустенітні сталі займають провідне місце серед конструкційних матеріалів сучасної промисловості завдяки поєднанню високих механічних властивостей, корозійної стійкості та технологічності. Однією з найбільш поширених є сталь AISI 304, яка широко застосовується в енергетиці, хімічній та нафтохімічній промисловості, суднобудуванні та машинобудуванні. Разом з тим зварювання, зокрема лазерне, супроводжується реалізацією нерівноважних умов кристалізації, що істотно впливають на мікроструктуру металу шва, фазовий склад, формування зони термічного впливу та неметалевих включень. У роботі наведено результати експериментального дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на мікроструктуру, фазовий склад і характер неметалевих включень у стикових з'єднаннях аустенітної корозійностійкої сталі AISI 304 товщиною 1,5 мм. Лазерне зварювання виконували Nd:YAG-лазером «DY044» на трьох режимах з однаковою погонною енергією 60 Дж/мм та величиною розфокусування лазерного випромінювання 0 мм при потужності лазерного випромінювання 1,5; 2,5 та 3,5 кВт і відповідних швидкостях зварювання 1,5; 2,5 та 3,5 м/хв. Мікроструктурні дослідження проводили методами оптичної мікроскопії у діапазоні збільшень $\times 50$ – $\times 500$, кількість δ -фериту визначали за допомогою приладу «Ferritgehaltmesser-1.053», оцінювання неметалевих включень здійснювали відповідно до DSTV ISO 4967:2017. Встановлено, що метал шва у всіх зразках характеризується дисперсною литою структурою з формуванням центральної

зони округлих зерен біля лінії сплавлення. Зі зростанням потужності лазерного випромінювання спостерігається звуження центральної комірчастої смужки, зменшення протяжності структурних зон і зниження інтенсивності взаємного затікання металу шва та основного металу. Вміст δ -фериту в металі шва має чітку тенденцію до зменшення від 1,7–1,8% до 0,8–0,9%, що свідчить про більш повну аустенітну стабілізацію при підвищених режимах зварювання. Найвища чистота металу за неметалевими включеннями зафіксована у зразку, звареному при потужності 3,5 кВт, де виявлено лише дисперсні точкові нітриди та оксинітриди з балом не вище №0,5. Зона термічного впливу у всіх випадках є вузькою, близько 600–900 мкм, без росту аустенітного зерна та зі збереженням структури прокату. Отримані результати підтверджують ефективність оптимізації параметрів лазерного зварювання для формування дрібнодисперсної мікроструктури, зниження вмісту δ -фериту та мінімізації неметалевих включень.

Ключові слова: лазерне зварювання, мікроструктура, тонколистовий метал, стикові з'єднання, корозійностійкі сталі, AISI 304.

Вступ. Корозійностійкі хромонікелеві сталі займають одне з провідних місць серед конструкційних матеріалів, що застосовуються у сучасній промисловості. Вони широко використовуються в хімічній, газовій, нафтохімічній, харчовій, автомобільній, авіаційно-космічній галузях, а також у ядерній енергетиці, суднобудуванні та криогенній

техніці [1-3]. Таке поширення зумовлене поєднанням високих механічних характеристик та корозійної стійкості.

Серед усіх класів корозійностійких сталей домінуюче місце займають аустенітні корозійностійкі сталі з гранецентрованою кубічною кристалічною ґраткою (ГЦК), частка яких на ринку становить близько 70 % [4-6]. Однією з найбільш поширених сталей цієї групи є AISI 304, яка містить приблизно 18 % хрому та 8 % нікелю і характеризується аустенітною структурою. Завдяки такому хімічному складу сталь AISI 304 поєднує високу корозійну стійкість, високу границю міцності та текучості, вигідне співвідношення міцності до маси і водночас значну пластичність [6-8]. Це зумовлює її широке застосування як конструкційного матеріалу, зокрема для елементів трубопроводів, корпусів арматури та внутрішніх компонентів реакторів у ядерній енергетиці.

Разом з тим зварювання, як один з основних способів з'єднання деталей із корозійностійких сталей, суттєво впливає на їхню мікроструктуру та експлуатаційні властивості. Під час зварювання відбуваються складні металургійні процеси, пов'язані з мікросегрегацією легуючих елементів, виділенням вторинних фаз, утворенням пористості, гарячих тріщин, ростом зерна в зоні термічного впливу (ЗТВ) та втратами матеріалу внаслідок випаровування [9-12]. За умов рівноважної кристалізації мікроструктура сталі AISI 304 складається переважно з аустеніту (γ -Fe), однак при лазерному зварюванні реалізуються нерівноважні умови швидкої кристалізації. Високі швидкості охолодження можуть призводити до неповного перетворення $\delta \rightarrow \gamma$, унаслідок чого в структурі зварного шва зберігається метастабільний δ -ферит [13, 14]. Відомо, що співвідношення фериту та аустеніту істотно залежить від тепловкладення, яке визначається параметрами лазерного зварювання, зокрема потужністю лазерного випромінювання та швидкістю зварювання.

У статті [15] було досліджено вплив параметрів лазерного зварювання на мікроструктуру та якість стикових з'єднань листової аустенітної корозійностійкої сталі AISI 304 товщиною 2,0 мм. Дослідники встановили, що мікроструктура зварних з'єднань характеризується дуже вузькою ЗТВ шириною лише кілька мікрометрів та дрібнодисперсною дендритною будовою металу шва. У зоні сплавлення формуються епітаксiальні

стовпчасті зерна, орієнтовані перпендикулярно до лінії сплавлення, з чітко вираженою лінією кристалізації в центрі шва. Зі зростанням тепловкладення збільшується міждендритна відстань, яка становить близько 5–7 мкм, тоді як при підвищених швидкостях зварювання формується більш дрібна мікроструктура.

У роботі [16] встановили, що під час лазерного зварювання сталі AISI 321 товщиною 2 мм у зоні плавлення спостерігається темна δ -Fe дендритна структура з вермікулярною морфологією в матриці аустеніту, що зумовлено високою швидкістю кристалізації та охолодження при низькому тепловкладенні. Ширина зони термічного впливу становить близько 60–80 мкм.

Мікроструктурні та механічні властивості зварних з'єднань сталі AISI 304, отриманих за допомогою TIG, лазерного та гібридного лазерно-TIG зварювання, досліджували у роботі [13]. Результати показали, що з'єднання, виконане лазерним зварюванням, мало найвищу міцність на розрив і найдрібнішу дендритну структуру порівняно з іншими методами.

Окремим фактором, що впливає на властивості зварних з'єднань корозійностійких сталей, є неметалічні включення. Вони неминуче формуються під час металургійних процесів унаслідок наявності розчиненого кисню та сторонніх домішок [17]. У корозійностійких сталях неметалічні включення мають особливе значення, оскільки в зоні локальної сегрегації навколо неметалічних включень відсутня суцільна пасивна плівка оксиду хрому, що сприяє ініціації пітингової корозії на межі «включення – матриця». Крім того, ці межі є чутливими до механічного відшарування під дією напружень, що негативно впливає на механічні властивості матеріалу [18].

В дослідженні [19] спробували проаналізувати зміни складу штучних сульфідних включень розміром до 1 мм, що складаються з NiS_2 , MnS або FeS , у корозійностійкій сталі AISI 304 після термічної обробки. Було виявлено, що вміст хрому в корозійностійкій сталі помітно зменшився навколо сульфідних включень. Ця зміна концентрації може бути спричинена реакціями обміну на межі розділу між сталлю та включеннями під час процесу охолодження. Збіднена хромом зона в корозійностійкій сталі може сприяти швидшій корозії матриці в поєднанні з утворенням шару осажденної сірки.

З аналізу наукових робіт видно, що швидке охолодження під час лазерного зварювання

забезпечує формування дрібнодисперсної мікроструктури з вузькою зоною термічного впливу та епітаксialними стовпчастими зернами, що підвищує механічні властивості та міцність зварних з'єднань. Водночас мінімізація неметалічних включень є необхідною, оскільки їх наявність призводить до збіднення на хром і підвищує ризик пітингової корозії. Таким чином, оптимальний вибір параметрів лазерного зварювання дозволяє досягти одночасно високої міцності та корозійної стійкості з'єднань.

Метою роботи є дослідження впливу параметрів лазерного зварювання на мікроструктуру стикових зварних з'єднань з тонколистової корозійностійкої високолегованої сталі AISI 304.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для дослідження мікроструктури було виконано стикові зварні з'єднання зразків зі сталі AISI 304 розміром $300 \times 200 \times 1,5$ мм. Крайки зразків були оброблені фрезеруванням для стикування без зазору та перед зварюванням нежирювали ацетоном.

Лазерне зварювання виконувалося з однаковою погонною енергією 60 Дж/мм та величиною розфокусування лазерного випромінювання на трьох режимах, де P – потужність лазерного випромінювання, V – швидкість зварювання, ΔF – величина розфокусування лазерного випромінювання:

- 1) $P=1,5$ кВт; $V=1,5$ м/хв; $\Delta F=0$ мм;
- 2) $P=2,5$ кВт; $V=2,5$ м/хв; $\Delta F=0$ мм;
- 3) $P=3,5$ кВт; $V=3,5$ м/хв; $\Delta F=0$ мм.

В якості захисного газу використовувався високочистий аргон з витратою $Q_{\text{корінь}} = 10$ л/хв, $Q_{\text{сопло}} = 25$ л/хв, $Q_{\text{хвіст}} = 20$ л/хв.

Хімічний склад сталі AISI 304 згідно ASTM A480/A480M-22a (масова частка елементів (макс., %): C 0,08; Si 0,8; Mn 2; Ni 9-11; S 0,02; P 0,035; Cr 17-19; Cu 0,3; Fe осн..

Як джерело лазерного випромінювання використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм, фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини). Пост для лазерного зварювання зображено на Рис. 1.

Для металографічних досліджень зразків було проведено оптичну мікроскопію з використанням збільшень $\times 50$; $\times 100$; $\times 200$; $\times 500$ за допомогою металографічного оптичного мікроскопа «Neophot-32» та фотокамери «Olympus C-500». Кількість α -фази (δ -ферит) вимірювали за допомогою приладу

«Ferritgehaltmesser-1.053». Досліджені зразки були підготовані за допомогою високошвидкісних полірувальних кругів з використанням алмазних паст різної дисперсності до 14 класу чистоти поверхні. Дослідження були проведені на різних ділянках кожного із зразків «метал шва $\rightarrow$ ЗТВ $\rightarrow$ основний метал». Металографічне дослідження неметалевих включень в металі здійснювалось за шкалами ДСТУ ISO 4967:2017 «Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Металографічний метод оцінювання за стандартними шкалами (ISO 4967:2013, IDT)».



Рис. 1. Пост для лазерного зварювання

Зразки виконані на обраних режимах зварювання: Зразок 1 ($P=1,5$ кВт; $V=1,5$ м/хв), Зразок 2 ($P=2,5$ кВт; $V=2,5$ м/хв) і Зразок 3 ($P=3,5$ кВт; $V=3,5$ м/хв) відрізняються за кількістю та розподілом неметалевих включень. У зразку 1 у шві спостерігаються точкові нітриди та оксинітриди з балом №0,5, у ЗТВ їх кількість дещо більша, але менша за бал №1. В основному металі включення досягають балу №1, зокрема рядкові нітриди. У зразку 2 включення такі ж, але їх менше, бал несуттєво перевищує №0,5. Зразок 3 має найвищу чистоту металу, при збільшенні $\times 1000$ проявляються лише дисперсні точкові нітриди та оксинітриди в невеликій кількості, бал яких не перевищує №0,5. Вища чистота зразка 3 може бути пов'язана з тим, що при потужності лазерного випромінювання 3,5 кВт неметалеві включення не встигають сформуватися й зафіксуватися в міждендритних ділянках, що забезпечує більшу чистоту мікроструктури зварного з'єднання.

Після досліджень на неметалеві включення було проведено виявлення структури металу зразків шляхом електролітичного травлення у 20% водному розчині сірчаноокислого амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

Загальний вигляд зразків після травлення зображено на Рис. 2.

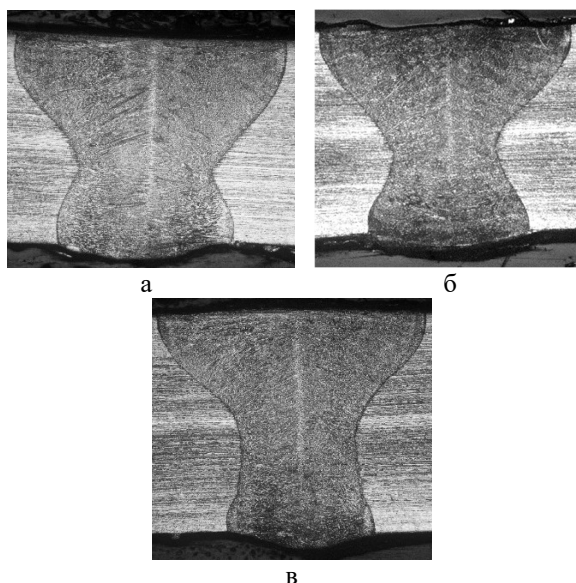


Рис. 2. Загальний вигляд стикових зварних з'єднань, $\times 50$: а – Зразок 1; б – Зразок 2, в – Зразок 3

Усі три зразки характеризуються дисперсною литою структурою металу шва з формуванням трьох характерних зон: центральної комірчастої, зони стовбчастих кристалітів та зони округлих зерен біля лінії сплавлення. Водночас між ними спостерігаються суттєві кількісні та морфологічні відмінності.

Зразок 1 має найбільш розвинену центральну смужку комірчастої структури, де розміри комірок досягають 5–18 мкм, а ширина смужки є максимальною серед усіх зразків (до 50 мкм у верхній частині шва). Зона стовбчастих кристалітів виражена чітко, з відносно більшими розмірами кристалітів. Смужка округлих зерен біля лінії сплавлення має середню ширину 25–30 мкм і виявляється локально (Рис. 3).

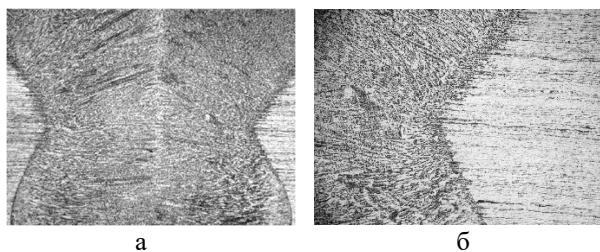


Рис. 3. Мікроструктура Зразка 1:
а – центральна частина, $\times 50$;
б – середня частина лінії сплавлення, $\times 200$

Зразок 2 відрізняється найбільш дрібнодисперсною центральною структурою: розміри комірок зменшуються до 2,5–8 мкм, а стовбчасті кристаліти мають найменшу ширину 2,5–5 мкм. Водночас зона округлих зерен біля

лінії сплавлення сягає 30–37 мкм та є найширшою серед усіх зразків, що свідчить про більш інтенсивні процеси перекристалізації в приповерхневій області шва (Рис. 4).

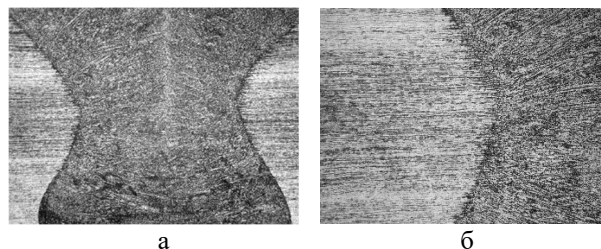


Рис. 4. Мікроструктура Зразка 2:
а – центральна частина, $\times 50$;
б – середня частина лінії сплавлення, $\times 200$

Зразок 3 характеризується найменшою шириною центральної комірчастої смужки, яка становить 15–25 мкм з подальшим звуженням та її частковим зникненням у нижній частині шва, що не спостерігалось у зразках 1 і 2. Розміри комірок займають проміжне положення з розміром 5–10 мкм. Зона округлих зерен є найвужчою (10–25 мкм) і додатково характеризується високим балом зерна №8–10, що вказує на більш дрібнозернисту та однорідну структуру поблизу лінії сплавлення (Рис. 5).

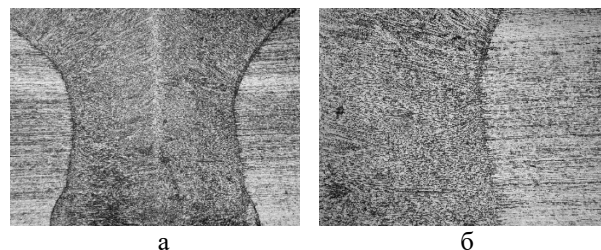


Рис. 5. Мікроструктура Зразка 3:
а – центральна частина, $\times 50$;
б – середня частина лінії сплавлення, $\times 200$

Узагальнюючи характеристику мікроструктури зразків можна сказати, що зразок 1 має найбільш грубу і протяжну центральну комірчасту зону, зразок 2 має найбільш дисперсну структуру в центрі шва та найширшу зону округлих зерен, тоді як зразок 3 вирізняється мінімальною шириною структурних зон, частковою деградацією комірчастої структури по висоті шва та найвищим ступенем подрібнення зерна біля лінії сплавлення.

У всіх трьох зразках лінія сплавлення чітко окреслена по всій висоті зварного з'єднання та характеризується взаємним затіканням металу шва й основного металу, однак інтенсивність і протяжність цього явища суттєво відрізняються.

Для зразка 1 ($P=1,5$ кВт; $V=1,5$ м/хв) характерне стабільне затікання металу шва в основний метал по всій висоті шва. Максимальна глибина затікання спостерігається в середній, найвужчій частині шва та становить 63–75 мкм, тоді як у верхній частині вона зменшується до 35–38 мкм, а в нижній частині зберігається на рівні до 25 мкм (Рис. 6).

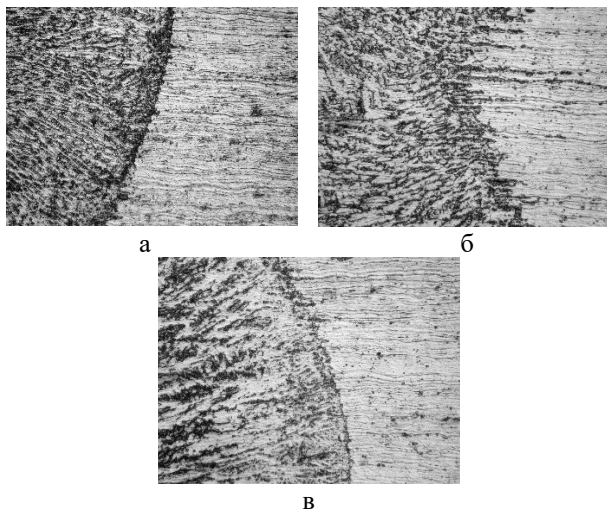


Рис. 6. Мікроструктура лінії сплавлення Зразка 1, $\times 500$: а – верхня частина; б – середня частина; в – нижня частина

У зразку 2 ($P=2,5$ кВт; $V=2,5$ м/хв) затікання є найбільш інтенсивним у центральній частині шва, де його глибина досягає 75–83 мкм, що є максимальним значенням серед усіх досліджених зразків. У верхній частині шва затікання зменшується до 34–37,5 мкм, а в нижній частині майже не проявляється і локально становить лише близько 10 мкм (Рис. 7).

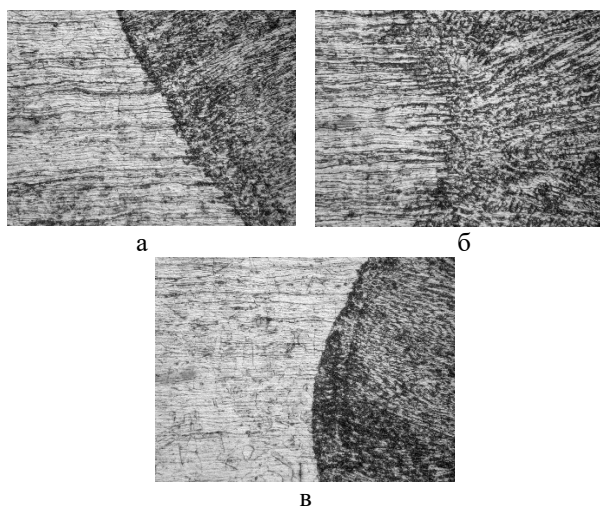


Рис. 7. Мікроструктура лінії сплавлення Зразка 2, $\times 500$: а – верхня частина; б – середня частина; в – нижня частина

Зразок 3 ($P=3,5$ кВт; $V=3,5$ м/хв) характеризується менш інтенсивним і більш локалізованим затіканням. У середній частині шва його величина становить 62–70 мкм, що є співставним зі зразком 1, проте у верхній частині шва затікання різко зменшується до 10–13 мкм, а в нижній частині повністю відсутнє (Рис. 8).

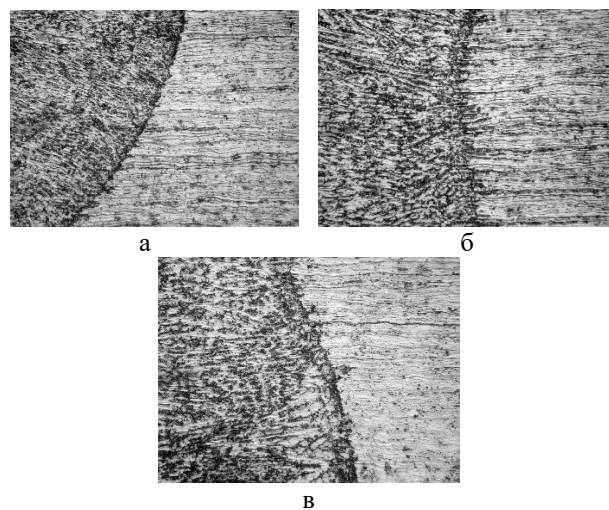


Рис. 8. Мікроструктура лінії сплавлення Зразка 3, $\times 500$: а – верхня частина; б – середня частина; в – нижня частина

Найбільш глибоке і концентроване затікання металу шва в основний метал спостерігається у зразку 2, зразок 1 демонструє найбільш рівномірний характер затікання по висоті шва, тоді як зразок 3 відзначається мінімальною інтенсивністю взаємного затікання, особливо у верхній та нижній частинах зварного з'єднання.

У досліджуваних зразках фазовий склад металу шва є подібним і представлений аустенітною матрицею з наявністю незначної кількості δ -фериту, однак його вміст має чітку тенденцію до зменшення від зразка 1 до зразка 3.

У зразку 1 зафіксовано найвищий вміст δ -фериту на рівні 1,7–1,8%, що свідчить про більш виражені умови кристалізації, сприятливі для його утворення. Для зразка 2 характерний проміжний рівень δ -фериту в межах 1–1,4%, що вказує на часткове зниження феритної складової порівняно зі зразком 1. Зразок 3 відрізняється мінімальним вмістом δ -фериту з часткою лише 0,8–0,9%, що свідчить про переважання аустенітної фази та більш повну аустенітну стабілізацію металу шва (Рис.9).

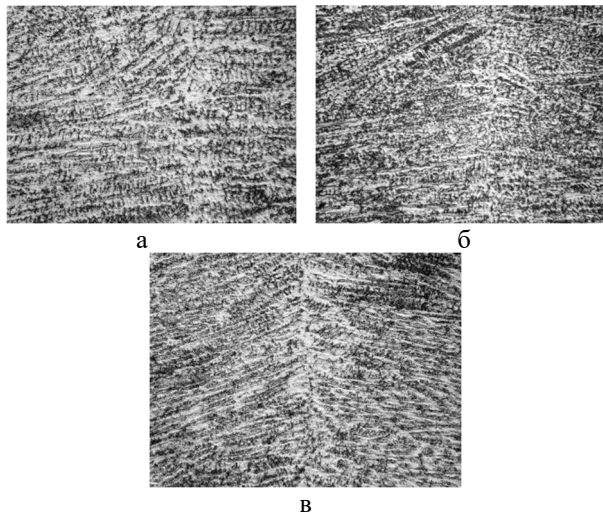


Рис. 9. Аустенітна матриця центральної частини зразків з незначною кількістю δ -фериту, $\times 500$:
а – Зразок 1; б – Зразок 2; в – Зразок 3

У всіх трьох зразках структура зони термічного впливу (ЗТВ) є подібною та візуально не відрізняється від структури основного металу. Аустенітне зерно має стабільний розмір, що відповідає №8–9 за шкалами ДСТУ, як безпосередньо біля лінії сплавлення, так і на віддаленні від неї, що свідчить про відсутність суттєвого перегріву та росту зерна.

Для зразків 1 і 2 ширина ЗТВ є однаковою та становить 600–900 мкм, тоді як у зразку 3 вона є дещо вужчою і більш рівномірною з розміром приблизно 600–650 мкм з однієї сторони шва і 600–700 мкм з іншої.

Фазовий склад ЗТВ у всіх випадках ідентичний фазовому складу основного металу і представлений аустенітною матрицею з невеликим вмістом δ -фериту. При цьому кількість δ -фериту має тенденцію до зменшення від зразка 1 до зразка 2: у зразку 1 вона становить 0,3–0,4%, у зразку 2 – до 0,2%, а у зразку 3 має проміжні значення 0,2–0,3%.

Важливою спільною ознакою для всіх зразків є збереження яскраво вираженої структури прокату як у металі ЗТВ, так і в основному металі, що підтверджує мінімальні структурні перетворення під дією тепла джерела зварювання (Рис. 10).

Порівняння отриманих результатів із даними дослідження [12] показує загальну узгодженість механізмів формування мікроструктури при лазерному зварюванні аустенітних сталей та окремі відмінності, зумовлені режимами зварювання.

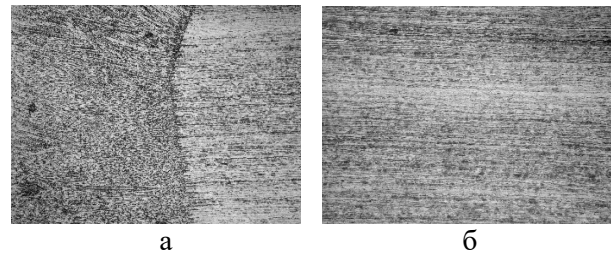


Рис. 10. Мікроструктура зразка 3, $\times 200$:
а – ЗТВ в середній частині, б – основний метал

У досліджених зразках метал шва має дрібнодисперсну литу структуру та поблизу лінії сплавлення спостерігається епітаксціальний ріст стовбчастих кристалітів, орієнтованих у напрямку тепловідведення. Розміри комірок і кристалітів 2,5–10 мкм добре корелюють з наведеним у роботі [12] вторинним міждендритним кроком 5–7 мкм, що підтверджує високі швидкості охолодження металу шва.

Водночас зафіксовано відмінність у ширині зони термічного впливу. У роботі [12] ширина ЗТВ становить близько 1,2 мм, тоді як у досліджених зразках вона є меншою і знаходиться в межах 600–900 мкм, що свідчить про більш локалізований термічний вплив та відсутність негативного ефекту на розмір зерна.

Описана у статті [12] кристалізаційна лінія в центрі шва відповідає в проведеному дослідженні центральній смужці комірчастої структури. Її звуження та часткове зникнення у зразку 3 потенційно зменшує ризик концентрації домішок і легкоплавких евтектик у центрі шва.

Висновки. На основі аналізу мікроструктури, фазового складу металу шва, лінії сплавлення та зони термічного впливу встановлено такі результати:

1. Зразок 1 ($P=1,5$ кВт; $V=1,5$ м/хв) характеризується найбільш розвиненою центральною комірчастою зоною та рівномірним взаємним затіканням металу шва й основного металу по всій висоті шва. Для зразка 2 ($P=2,5$ кВт; $V=2,5$ м/хв) підтверджено максимальну інтенсивність затікання у середній частині шва та найвищу дисперсність структури в центральній зоні, тоді як у зразку 3 ($P=3,5$ кВт; $V=3,5$ м/хв) зафіксовано мінімальну ширину структурних зон, локалізацію теплового впливу та часткове зникнення комірчастої структури в нижній частині шва.

2. Послідовне зменшення вмісту δ -фериту в металі шва від зразка 1 до зразка 3 (з 1,7–1,8% до 0,8–0,9%), що свідчить про зростання аустенітної стабільності металу шва. Показано, що лінія сплавлення є чіткою у всіх зразках, однак характер взаємного затікання істотно різниться: від рівномірного у зразку 1 до мінімального й локального у зразку 3.
3. Зона термічного впливу не зазнає суттєвих структурно-фазових змін. Зберігається дрібнозерниста аустенітна структура з балом зерна №8–9, незначний вміст δ -фериту (до 0,4%) та чітко виражена структура прокату. При цьому найменшу та найбільш рівномірну ширину ЗТВ зафіксовано у зразку 3, що підтверджує найбільш локалізований тепловий вплив.

Таким чином, досягнуто формування якісного зварного з'єднання з мінімальними структурними змінами в ЗТВ, а оптимальні мікроструктурні та фазові показники, з точки зору дисперсності структури, стабільності аустеніту та локалізації теплового впливу, реалізовані у зразку 3.

Перспективним напрямом подальших досліджень є вивчення тонкої структури металу швів методом електронної мікроскопії з метою детальнішого аналізу структури та можливих зон мікросегрегації легуючих елементів.

Література

1. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A. Automated laser welding of AISI 304 stainless steel by disk laser. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63, no. 4. P. 1663–1672. URL: <https://doi.org/10.24425/amm.2018.125091> (date of access: 24.01.2026).
2. Reda A., Shahin M. A., Montague P. Review of material selection for Corrosion-Resistant Alloy Pipelines. *Engineered Science*. 2025. Vol. 33. 1373. URL: <https://doi.org/10.30919/es1373> (date of access: 24.01.2026).
3. Muazu Haliru Tadama, Umar Muazu Tadama. The Superiority of Super 13Cr Stainless Steels Alloys over the other Corrosion Resistance Alloys (CRAs) in the Oil and Gas Industry: A Review. *Journal of Scientific Development Research*. 2024. Vol. 6, no. 9. URL: <https://hummingbirdjournals.com/jsdr/article/view/256> (date of access: 24.01.2026).
4. Yurchenko Yu. Actual problems of laser welding of thin-walled products made of corrosion-resistant high-alloy steels (Review). *Avtomatychne Zvaryuvannya*. 2025. Vol. 6, P. 30–42. URL: <https://doi.org/10.37434/as2025.06.04> (date of access: 24.01.2026).
5. Malandrucolo A. Superaustenitic stainless steels. In *Engineering materials*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-68744-0> (date of access: 26.01.2026).
6. Yurchenko Y., Siora O., Sokolovskyi M., Hryn A., Frolov M., Bernatskyi, A. Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *Advances in mechanical engineering and transport*. (2025). Vol. 2, no. 25. P. 87–96. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914> (date of access: 24.01.2026).
7. Kumar N., Mukherjee M., Bandyopadhyay A. Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 94. P. 296–309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008> (date of access: 24.01.2026).
8. Юрченко Ю., Сіора О., Соколовський М., Гардер Д. Бернацький А. Лазерне зварювання тонкостінних виробів з віссю обертання типу труба-штуцер виготовлених з корозійностійких високолегованих сталей. *ВІСНИК СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ імені Володимира Даля*. 2025. Т. 1, № 287. С. 12–20. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-12-20> (дата звернення: 24.01.2026).
9. Malandrucolo A., Menapace C., Giroletti I. Metallurgy, Properties and Applications of Superaustenitic Stainless Steels—SASSs. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 13. 3079. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18133079> (date of access: 24.01.2026).
10. Юрченко Ю. В., Сіора О. В., Соколовський М. В., Набок Т. М., Бернацький А. В. Відпрацювання технології лазерного зварювання тонкостінних циліндричних виробів зі сталі 12X18H10T. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2025. Т.1ю С. 15–26. URL: [https://doi.org/10.15589/smi2025.1\(20\).02](https://doi.org/10.15589/smi2025.1(20).02) (дата звернення: 24.01.2026).
11. Lahiri A.K. Metallurgical Aspects of Welding. In: *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore. 2017. P. 141–176. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4684-1_7 (date of access: 24.01.2026).
12. Olanipekun A. T., Maledi N. B., Mashinini P. M. The synergy between powder metallurgy processes and welding of metallic alloy: a review. *Powder Metallurgy*. 2020. Vol. 63, no. 4. P. 254–267. URL: <https://doi.org/10.1080/00325899.2020.1807712> (date of access: 24.01.2026).
13. Yan J., Gao M., Zeng X. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. Vol. 48, no. 4. P. 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.009> (date of access: 24.01.2026).
14. Zhou X., Liu Y., Qiao Z., Guo Q., Liu C., Yu L., Li H. Effects of cooling rates on δ -ferrite/ γ -austenite formation and martensitic transformation in modified ferritic heat resistant steel. *Fusion Engineering and*

- Design*. 2017. Vol. 125. P. 354–360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.095> (date of access: 24.01.2026).
15. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 1, no. 98. P. 32–40. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0815> (date of access: 24.01.2026).
 16. Hussain A., Hamdani A. H., Akhter R. CO₂ laser welding of AISI 321 stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 60. 012042. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/60/1/012042> (date of access: 24.01.2026).
 17. Park J. H., Kang Y. Inclusions in Stainless Steels – a review. *Steel Research International*. 2017. Vol. 88, no. 12. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.201700130> (date of access: 24.01.2026).
 18. Zhang L., Ren Y. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0> (date of access: 24.01.2026).
 19. Williams D. E., Zhu Y. Y. Explanation for initiation of pitting corrosion of stainless steels at sulfide inclusions. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147, no. 5. 1763. URL: <https://doi.org/10.1149/1.1393431> (date of access: 24.01.2026).
- ### References
1. Lisiecki A., Kurc-Lisiecka A. Automated laser welding of AISI 304 stainless steel by disk laser. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 63, no. 4. P. 1663–1672. URL: <https://doi.org/10.24425/amm.2018.125091> (date of access: 24.01.2026).
 2. Reda A., Shahin M. A., Montague P. Review of material selection for Corrosion-Resistant Alloy Pipelines. *Engineered Science*. 2025. Vol. 33. 1373. URL: <https://doi.org/10.30919/es1373> (date of access: 24.01.2026).
 3. Muazu Haliru Tadama, Umar Muazu Tadama. The Superiority of Super 13Cr Stainless Steels Alloys over the other Corrosion Resistance Alloys (CRAs) in the Oil and Gas Industry: A Review. *Journal of Scientific Development Research*. 2024. Vol. 6, no. 9. URL: <https://hummingbirdjournals.com/jsdr/article/view/256> (date of access: 24.01.2026).
 4. Yurchenko Yu. Actual problems of laser welding of thin-walled products made of corrosion-resistant high-alloy steels (Review). *Avtomatychne Zvaryuvannya*. 2025. Vol. 6, P. 30–42. URL: <https://doi.org/10.37434/as2025.06.04> (date of access: 24.01.2026).
 5. Malandrucolo A. Superaustenitic stainless steels. In *Engineering materials*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-68744-0> (date of access: 24.01.2026).
 6. Yurchenko Y., Siora O., Sokolovskyi M., Hryn A., Frolov M., Bernatskyi, A. Influence of laser welding parameters on the geometry of welded joints of thin-sheet stainless steel AISI 304. *Advances in mechanical engineering and transport*. (2025). Vol. 2, no. 25. P. 87–96. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1914> (date of access: 24.01.2026).
 7. Kumar N., Mukherjee M., Bandyopadhyay A. Study on laser welding of austenitic stainless steel by varying incident angle of pulsed laser beam. *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 94. P. 296–309. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.008> (date of access: 24.01.2026).
 8. Yurchenko Yu., Siora O., Sokolovskyi M., Harder D., Bernatskyi A. Lazerne zvaryuvannya tonkostinnykh vyrobiv z vissiu obertannia typu truba-shtutser vyhotovlenykh z koroziihostiikykh vysokolehovanykh stalei. *VISNYK SKhidNOUKRAINSKOHO NATSIONALNOHO UNIVERSYTETU Imeni Volodymyra Dalia*. 2025. Vol. 1, no. 287. P. 12–20. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-287-1-12-20> (date of access: 24.01.2026).
 9. Malandrucolo A., Menapace C., Giroletti I. Metallurgy, Properties and Applications of Superaustenitic Stainless Steels – SASSs. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 13. 3079. URL: <https://doi.org/10.3390/ma18133079> (date of access: 24.01.2026).
 10. Yurchenko Yu. V., Siora O. V., Sokolovskyi M. V., Nabok T. M., Bernatskyi A. V. Vidpratsiuvannya tekhnolohii lazernoho zvaryuvannya tonkostinnykh tsylindrychnykh vyrobiv zi stali 12Kh18N10T. *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2025. Vol. 1. P. 15–26. URL: [https://doi.org/10.15589/smi2025.1\(20\).02](https://doi.org/10.15589/smi2025.1(20).02) (date of access: 24.01.2026).
 11. Lahiri A.K. Metallurgical Aspects of Welding. In: *Applied Metallurgy and Corrosion Control*. Indian Institute of Metals Series. Springer, Singapore. 2017. P. 141–176. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-10-4684-1_7 (date of access: 24.01.2026).
 12. Olanipekun A. T., Maledi N. B., Mashinini P. M. The synergy between powder metallurgy processes and welding of metallic alloy: a review. *Powder Metallurgy*. 2020. Vol. 63, no. 4. P. 254–267. URL: <https://doi.org/10.1080/00325899.2020.1807712> (date of access: 24.01.2026).
 13. Yan J., Gao M., Zeng X. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009. Vol. 48, no. 4. P. 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.009> (date of access: 24.01.2026).
 14. Zhou X., Liu Y., Qiao Z., Guo Q., Liu C., Yu L., Li H. Effects of cooling rates on δ -ferrite/ γ -austenite formation and martensitic transformation in modified ferritic heat resistant steel. *Fusion Engineering and Design*. 2017. Vol. 125. P. 354–360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.05.095> (date of access: 24.01.2026).
 15. Kurc-Lisiecka A., Lisiecki A. Laser welding of stainless steel. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. Vol. 1, no. 98. P. 32–40. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.0815> (date of access: 24.01.2026).

16. Hussain A., Hamdani A. H., Akhter R. CO₂ laser welding of AISI 321 stainless steel. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 60. 012042. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/60/1/012042> (date of access: 24.01.2026).
17. Park J. H., Kang Y. Inclusions in Stainless Steels – a review. *Steel Research International*. 2017. Vol. 88, no. 12. URL: <https://doi.org/10.1002/srin.201700130> (date of access: 24.01.2026).
18. Zhang L., Ren Y. *Handbook of Non-Metallic Inclusions in Steels*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-97-9638-0> (date of access: 24.01.2026).
19. Williams D. E., Zhu Y. Y. Explanation for initiation of pitting corrosion of stainless steels at sulfide inclusions. *Journal of the Electrochemical Society*. 2000. Vol. 147, no. 5. 1763. URL: <https://doi.org/10.1149/1.1393431> (date of access: 24.01.2026).

Yurchenko Yu.V., Siora O.V., Lukashenko V.A., Harder D.A., Sokolovskyi M.V., Bernatskyi A.V.
Study of the influence of laser welding parameters on the microstructure of butt welded joints of aisi 304 stainless steel

Chromium–nickel austenitic stainless steels occupy a leading position among structural materials in modern industry due to the combination of high mechanical properties, corrosion resistance, and good manufacturability. One of the most widely used grades is AISI 304 steel, which is extensively applied in the energy sector, chemical and petrochemical industries, shipbuilding, and mechanical engineering. At the same time, welding, particularly laser welding, is associated with the implementation of nonequilibrium solidification conditions, which significantly affect the weld metal microstructure, phase composition, formation of the heat-affected zone, and non-metallic inclusions. This paper presents the results of an experimental study on the effect of laser welding parameters on the microstructure, phase composition, and characteristics of non-metallic inclusions in butt joints of austenitic stainless steel AISI 304 with a thickness of 1.5 mm. Laser welding was performed using an Nd:YAG laser “DY044” under three welding modes with the same linear energy of 60 J/mm and a laser beam defocusing value of 0 mm, at laser power levels of 1.5, 2.5, and 3.5 kW and corresponding welding speeds of 1.5, 2.5, and 3.5 m/min. Microstructural investigations were carried out by optical microscopy in the magnification range of ×50–×500. The δ-ferrite content was measured using a “Ferritgehaltmesser-1.053” device, while the evaluation of non-metallic inclusions was performed in accordance with DSTU ISO 4967:2017. It was established that the weld metal in all specimens is characterized by a dispersed cast structure with the formation of a central cellular zone, a zone of columnar crystallites, and a zone of equiaxed grains near the fusion line. With increasing laser power, a narrowing of the central cellular band, a reduction in the extent of structural zones, and a decrease in the intensity of mutual penetration between the weld

metal and the base metal are observed. The δ-ferrite content in the weld metal shows a clear tendency to decrease from 1.7–1.8% to 0.8–0.9%, indicating a more complete austenitic stabilization at higher welding modes. The highest weld metal purity with respect to non-metallic inclusions was recorded in the specimen welded at a laser power of 3.5 kW, where only dispersed point nitrides and oxynitrides with a rating not exceeding No. 0.5 were detected. The heat-affected zone in all cases is narrow, about 600–900 μm, without austenitic grain growth and with preservation of the rolled structure. The obtained results confirm the effectiveness of optimizing laser welding parameters for the formation of a fine-dispersed microstructure, reduction of δ-ferrite content, and minimization of non-metallic inclusions.

Keywords: laser welding, microstructure, sheet metal, butt joints, stainless steels, AISI 304.

Юрченко Юрій Вікторович – аспірант, провідний інженер відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) yuriyyurchenko14@gmail.com

Сіора Олександр Васильович – науковий співробітник відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) siora_ov@ukr.net

Лукашенко Володимир Андрійович – к.т.н., науковий співробітник відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) z_lyk@ukr.net

Гардер Дмитро Андрійович – к.т.н., науковий співробітник відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) laser-77@online.ua

Соколовський Микола Володимирович – аспірант, провідний інженер відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

Бернацький Артемій Володимирович – к.т.н., старший дослідник, зав. відділу №77 «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (м. Київ) bernatskyi@paton.kiev.ua

Стаття подана 12.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-56-60>

УДК 629.017

ВПЛИВ ПРИЧІПНИХ ЛАНОК НА СТІЙКІСТЬ РУХУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА З ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЮ РАМОЮ

Подригало М.А., Краснокутський В.М.

THE INFLUENCE OF TRAILER COUPLINGS ON THE STABILITY OF WHEELED TRACTORS WITH ARTICULATED FRAMES

Podrigalo M.A., Krasnokutskyi V.M.

У статті наведено результати дослідження впливу причіпних ланок на стійкість руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при роботі у складі тракторного потягу з двовісним причепом. Показано, що агрегування трактора з причіпною ланкою призводить до перерозподілу нормальних реакцій дороги між передніми та задніми колесами, що суттєво впливає на керованість і стійкість потягу проти складання. Встановлено, що поширені традиційні методи розрахунку, у яких тягова сила вважається прикладеною у плямі контакту колеса з опорною поверхнею, не завжди коректно відображають реальні силові взаємодії в системі «трактор–причіп», особливо для машин із шарнірно-зчленованою рамою та зміщеним уперед центром мас.

Проведено аналіз впливу геометричних параметрів причіпного пристрою, зокрема вертикальної координати осі зчеплення ланок, на зміну сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора. Запропоновано уточнену розрахункову схему тракторного потягу з двовісним причепом, в якій тягова сила та сили опору коченню прикладаються безпосередньо на осях ведучих коліс. Такий підхід дозволив отримати аналітичні залежності, що більш точно описують перерозподіл навантажень між осями при різних варіантах розташування осі зчеплення причіпної ланки та режимах руху агрегату.

На основі рівнянь рівноваги моментів доведено, що при агрегуванні з двовісним причепом вертикальне навантаження на задні колеса трактора може як збільшуватися, так і зменшуватися. Визначено умови, за яких забезпечується зростання сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах, а саме розміщення осі зчеплення ланок вище осі задніх коліс трактора. У протилежному випадку

спостерігається зменшення навантаження, що призводить до погіршення стійкості тракторного потягу проти складання та зниження безпеки експлуатації.

Отримані результати мають важливе практичне значення для конструювання, вибору та модернізації причіпних пристроїв колісних тракторів із шарнірно-зчленованою рамою, а також для підвищення безпеки та ефективності їх експлуатації в реальних умовах роботи.

Ключові слова: колісний трактор, шарнірно-зчленована рама, причіпна ланка, стійкість руху, центр мас, тягова сила

Вступ. Використання причіпних ланок викликає перерозподіл нормальних реакцій дороги між передніми та задніми колесами колісних тракторів. При наявності зусилля, яке розтягує ланки тракторного потягу, у відповідності до існуючих підходів до розрахунку, це повинно збільшувати нормальні реакції дороги на задніх колесах і зменшувати на передніх колесах. Для колісних тракторів, прикладом яких є трактори з шарнірно-зчленованою рамою, зі зміщеним до передньої вісі центром мас, це призводить до підвищення стійкості потягу проти складання [1]. Але це виконується не завжди. Результати дослідження, яке проведено, виявило, що, в залежності від вертикальної координати осі зчеплення ланок вертикальне навантаження задніх коліс може збільшуватися, а може зменшуватися. Для забезпечення підвищення нормальних реакцій дороги на задніх колесах ось зчеплення ланок повинна знаходитися вище осі задніх коліс.

Аналіз останніх досягнень у публікаціях.

В дослідженні [2] проведено аналіз методів розрахунку розподілу нормальних реакцій дороги між осями тракторного агрегату. Показано, що відомі розрахунки, які базуються на тому положенні, що тяглова сила прикладена у плямі контакту колеса з дорогою, не відповідають справжньому явищу. Дослідження, які представлено в роботі [2], показали, що більш коректне складання розрахункової схеми тракторного агрегату з прикладанням тягової сили та сили опору кочення на осях коліс [3, 4] показує збільшення сумарної нормальної реакції на передніх колесах при розташуванні вертикальної координати осі зчеплення ланок вище ніж ось заднього ведучого колеса. Збільшення нормальної реакції дороги на передніх колесах дозволяє підвищити керованість колісного трактора [5, 6]. Для колісних тракторів з шарнірно-зчленованою рамою при агрегуванні з причіпними ланками важливе забезпечення стійкості тракторного потягу проти складання, що забезпечується нормальними реакціями дороги на задніх колесах трактора [7–16]. Розглянемо розрахункову схему тракторного потягу у складі колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою та двовісного причепа при традиційному підході (рис. 1).

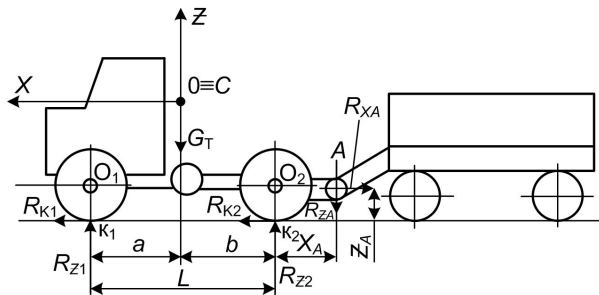


Рис.1. Схема сил, що діють на тракторний потяг при традиційному підході до прикладання тягової сили

Для визначення сумарної нормальної реакції дороги R_{z2} на задніх колесах трактора запишемо рівняння

$$\sum M_{K1} = -G_T a + R_{z2} L - R_{zA} (x_A + L) - R_{xA} z_A, \quad (1)$$

де G_T – вага трактора,

$$G_T = m_T g, \quad (2)$$

m_T – маса трактора;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

a – відстань між передньою віссю та проекцією центру мас трактора на горизонтальну площину;

L – база трактора;

R_{zA} ; R_{xA} – вертикальна горизонтальна складові реакції в шарнірі А;

x_A ; z_A – горизонтальна та вертикальна координати розташування осі зчеплення ланок тракторного потягу.

З рівняння (1) знаходимо сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах

$$\begin{aligned} R_{z2} &= G_T \frac{a}{L} + R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L} \right) + R_{xA} \frac{z_A}{L} = \\ &= G_T \frac{a}{L} \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a} \right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A}{a} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

Сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах трактора можна уявити у вигляді

$$R_{z2} = R_{z20} + \Delta R_{z2}, \quad (4)$$

де R_{z20} – сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора при відсутності причіпної ланки;

ΔR_{z2} – збільшення сумарної нормальної реакції на задніх колесах трактора за рахунок причіпної ланки

$$R_{z20} = G_T \frac{a}{L}, \quad (5)$$

З рівняння (4), із урахуванням виразів (3) і (5), отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta R_{z0} &= R_{z2} - R_{z20} = G_T \frac{a}{L} \times \\ &\times \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a} \right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A}{a} \right] - G_T \frac{a}{L} = \\ &= R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L} \right) + R_{xA} \frac{z_A}{L}. \end{aligned} \quad (6)$$

При двовісній причіпній ланці можна прийняти $\Delta R_A \approx 0$. В цьому випадку

$$R_{z2} = R_{xA} \frac{z_A}{L} > 0, \quad (7)$$

Таким чином, при традиційному підході, наявність причіпної ланки збільшує сумарну нормальну реакцію дороги на задніх колесах трактора, що повинно покращити стійкість тракторного потягу проти складання. Однак, як раніше показали дослідження [2, 3], традиційний підхід не відповідає істинному явищу.

Мета і постановка завдань дослідження.

Метою дослідження є збільшення точності знаходження сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора із шарнірно-зчленованою рамою при агрегуванні з двовісним причепом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити завдання визначення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах колісного трактора із шарнірно-зчленованою рамою і двовісним причепом у випадку прикладання тягових сил на осях коліс.

Виклад основного матеріалу. На рис.2 наведено розрахункову схему тракторного потягу при прикладанні тягових сил на осях ведучих коліс

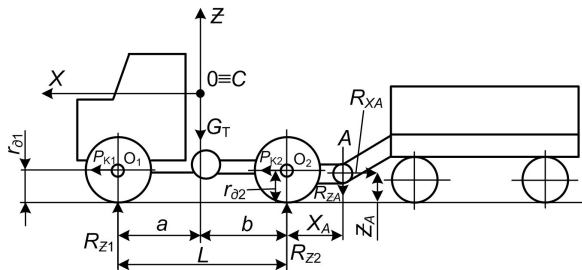


Рис. 2. Схема сил, що діють на тракторний потяг при прикладанні тягових сил на осях ведучих коліс

Для визначення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора визначимо рівняння суми моментів відповідно точки O_1

$$\sum M_{O_1} = R_{z2}L - G_T a - R_{zA}(L + x_A) - R_{xA}(z_A - r_{02}) = 0 \quad (8)$$

де r_{02} – динамічний радіус заднього ведучого колеса (можна прийняти $r_{02} = r_{01} = r_0$)

r_{01} – динамічний радіус переднього ведучого колеса

r_0 – динамічний радіус ведучих коліс

P_{K1} – тягова сила на осі переднього ведучого колеса

P_{K2} – тягова сила на осі заднього ведучого колеса

З рівняння (8) отримаємо

$$R_{z2} = G_T \frac{a}{L} + R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L} \right) + R_{xA} \frac{z_A - r_{02}}{L} = G_T \frac{a}{L} \left[1 + \frac{R_{zA}}{G_T} \left(\frac{L}{a} + \frac{x_A}{a} \right) + \frac{R_{xA}}{G_T} \frac{z_A - r_{02}}{a} \right] \quad (9)$$

Збільшення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора після агрегування з причіпною ланкою

$$\Delta R_{z2} = R_{z2} - R_{z20} = R_{zA} \left(1 + \frac{x_A}{L} \right) + R_{xA} \frac{z_A - r_{02}}{L} \quad (10)$$

При агрегуванні трактора з двовісним причепом можна прийняти $R_{zA} \approx 0$. В цьому випадку рівняння (10) прийме вигляд

$$\Delta R_{z2} = R_{xA} \frac{z_A - r_{02}}{L} \quad (11)$$

Сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора буде збільшуватися при агрегуванні з причіпною ланкою у випадку $\Delta R_z > 0$. Останнє можливо при $z_A > r_{02}$, що реалізується за рахунок найбільш високої точки встановленої осі зчеплення ланок. При $z_A < r_{02}$ величина $\Delta R_{z2} < 0$, що означає зменшення сумарної нормальної реакції дороги на задніх колесах трактора після з'єднання з причіпною ланкою. Останнє викликає погіршення стійкості тракторного потягу проти складання.

Висновки.

1. Існуючі методи розрахунку сумарних реакцій дороги на осях колісних тракторів, особливо при врахуванні взаємодії з причіпними ланками, дають помилковий результат про збільшення стійкості тракторного потягу проти складання.

2. Більш коректне використання розрахункової схеми тракторного потягу, який складається із колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою та двовісного причепа, дозволило визначити, що при встановленні осі кріплення ланок вище осі задніх коліс ($z_A > r_{02}$) стійкість потягу проти складання підвищується, оскільки збільшується сумарна нормальна реакція дороги на задніх колесах трактора.

Література

1. Галич І. В., Антощенко Р. В., Антощенко В. М. До дослідження динаміки трактора з шарнірно-з'єднаною рамою і урахуванням нерівності опорної поверхні // Інженерія природокористування. 2019. №2(12). С. 28–37.
2. Подригало М.А., Краснокутський В.М. Вплив причіпних ланок на керованість тракторних самохідних шасі // Вісник машинобудування та транспорту. 2024. №1(19). С. 109–114. DOI: <https://doi.org/1031649/2413-4503-2024-19-1-109-114>.
3. Подригало М.А., Шелудченко В.В. Нове в теорії експлуатаційних властивостей автомобілів та тракторів. Навчальний посібник. – Суми: Сумський національний аграрний університет, – 2015. – 213 с.
4. Динаміка колеса автомобіля. Монографія [текст] / А.У. Абдулгасіс, Д.В. Абрамов, М.П. Артёмов, В.І. Гацько, З.Е. Забелишенський, Д.М. Клец, О.О. Назарько, М.А. Подригало, О.С. Полянський, М.М. Потапов, В.Л. Файст; під ред. М.А. Подригало та О.С. Полянського. – Х.: ХНАДУ, 2019. – 199 с.
5. Є. І. Калінін, М. А. Кусков, О. М. Бельорін-Еррера. Особливості повороту шарнірно-зчленованого трактора // Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. Випуск 1(67). С. 30–33.
6. Клец Д. М. Определение взаимосвязи между критериями маневренности колесных машин // Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 31 (1004). С. 35–43.
7. Волонцевич Д. О. К вопросу моделирования подсистемы эластичное колесо-дорога для шарнирно-сочленённых колёсных машин / Д. О. Волонцевич, В. А. Карпенко, В. М. Качур // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. Автомобіле- та тракторобудування. 2004. № 16. С. 149–156.
8. Динаміка руху колісних тракторів: монографія / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, М. Є. Якунін. – Харків. Видавець: О. А. Мірошніченко, 2021. – 320 с.
9. Мамонтов А. Г. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом / А. Г. Мамонтов, А. П. Кожушко, О. Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2019. № 1. С. 29–41.
10. Кальченко Б. І. Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / Б. І. Кальченко, А. П. Кожушко // Вісник НТУ «ХПІ». 2017. № 44 (1266). С. 110–115.
11. Кальченко Б. І. Плавність руху як складова динаміки трактора: монографія / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. П. Кожушко, А. Г. Мамонтов. – Х.: ФОП Панов А.М., 2018. – 164 с.
12. Ребров О. Ю. Теоретичне обґрунтування основних параметрів колісних сільськогосподарських тракторів / Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів, ХНТУСГ. 2017. №8. С. 243–254.
13. Кожушко А. П. Дослідження плавності руху машинотракторного агрегату з перемінною масою при виконанні транспортної роботи / А. П. Кожушко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2019. № 15. С. 50–57.
14. Надикто В., Кюрчев В. Нові елементи теорії тягової динаміки та експлуатації колісних тракторів // Техніка і технології АПК. 2021. №4 (117). С. 21–26.
15. Кальченко Б. І. Вплив плавності ходу колісних тракторів на навантаженість трансмісії / Б. І. Кальченко, О. Ю. Ребров, А. П. Кожушко // Автомобільний транспорт. 2017. № 41. С. 30–37.
16. Надикто В. Визначення номінального тягового зусилля трактора // Bulletin of Agricultural Science. 2024. №12. С. 51–56.

References

1. Galych I.V., Antoshchenkov R.V., Antoshchenkov V.M. To study the dynamics of the tractor with articulated frame and taking into account the inequality of the supporting surface // Engineering of nature management. 2019. №2 (12). P. 28–37.
2. Podrigalo M. A., Krasnokutskyi V. M. The influence of towing links on the handling of tractor self-propelled chassis // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. 2024. No. 1(19). P. 109–114. DOI: <https://doi.org/1031649/2413-4503-2024-19-1-109-114>.
3. Podrigalo M.A., Sheludchenko V.V. New developments in the theory of operational properties of cars and tractors: textbook. – Sumy: Sumy National Agrarian University, 2015. – P. 213.
4. Dynamics of a car wheel. Monograph [text] / A.U. Abdulhazis, D.V. Abramov, M.P. Artomov, V.I. Hatsko, Z.E. Zabelyshenskyi, D.M. Klets, O.O. Nazarko, M.A. Podrigalo, O.S. Polianskyi, M.M. Potapov, V.L. Faist; edited by M.A. Podrigalo and O.S. Polianskyi – Kharkiv: KNAHU, 2019. – 199 p.
5. Ye. Kalinin, M. Kuskov, O. Bellorin-Herrera. Features of rotation of the articulated tractor // Control, navigation and communication systems. 2022. Issue 1(67). P. 30–33.
6. Klets D. M. Determination of the relationship between the maneuverability criteria of wheeled vehicles / D. M. Klets // Bulletin of NTU “KhPI.” 2013. No. 31 (1004). P. 35–43.
7. Volontsevych D. O. On the modeling of the elastic wheel-road subsystem for ball-jointed wheeled vehicles / D. O. Volontsevych, V. A. Karpenko, V. M. Kachur // Bulletin of the National Technical University “KhPI.” Series: Automobile and Tractor Engineering. 2004. No. 16. P. 149–156.
8. Dynamics of wheeled tractors: monograph / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. G. Mamontov, A. P. Kozhushko, M. Ye. Yakunin. – Kharkiv. Publisher: O. A. Miroshnychenko, 2021. – 320 p.

9. Mamontov A. G. Formation of a mathematical model of the dynamic load of the running gear of a wheeled tractor with a semi-trailer unit / A. G. Mamontov, A. P. Kozhushko, O. Yu. Rebrov // Bulletin of the National Technical University "KhPI". 2019. No. 1. P. 29–41.
10. Kalchenko B. I. Research on the dynamic stability and smoothness of wheeled tractors / B. I. Kalchenko, A. P. Kozhushko // Bulletin of NTU "KhPI". 2017. No. 44 (1266). P. 110–115.
11. Kalchenko B. I. Smoothness of movement as a component of tractor dynamics: monograph / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. P. Kozhushko, A. G. Mamontov. – Kharkiv: FOP Panov A.M., 2018. – 164 p.
12. Rebrov O. Yu. Theoretical justification of the basic parameters of wheeled agricultural tractors / Technical service of agro-industrial, forestry, and transport complexes, KhNTUA. 2017. No. 8. P. 243–254.
13. Kozhushko, A. P. Research on the smoothness of movement of a machine-tractor unit with variable mass when performing transport work / A. P. Kozhushko // Automobile and Electronics. Modern Technologies. 2019. No. 15. P. 50–57.
14. Nadykto V., Kiurchev V. New elements of the theory of traction dynamics and operation of wheeled tractors // Technology and Technologies of the Agro-Industrial Complex. 2021. No. 4 (117). P. 21–26.
15. Kalchenko B. I. Influence of the smoothness of wheeled tractors on transmission load / B. I. Kalchenko, O. Yu. Rebrov, A. P. Kozhushko // Automobile Transport. 2017. No. 41. P. 30–37.
16. Nadykto V. Determination of the nominal tractive effort of a tractor // Bulletin of Agricultural Science. 2024. No. 12. P. 51–56.

Podrigalo M.A., Krasnokutskyi V.M. The influence of trailer couplings on the stability of wheeled tractors with articulated frames

The article presents the results of a study of the influence of trailer links on the stability of a wheeled tractor with an articulated frame when working in a tractor train with a two-axle trailer. It is shown that coupling a tractor with a trailer link leads to a redistribution of normal road reactions between the front and rear wheels, which significantly affects the maneuverability and stability of the train against folding. It has been established that common traditional calculation methods, in which the tractive force is considered to be applied at the point of contact between

the wheel and the supporting surface, do not always correctly reflect the actual force interactions in the "tractor-trailer" system, especially for machines with an articulated frame and a forward-shifted center of mass.

An analysis of the influence of the geometric parameters of the towing device, in particular the vertical coordinate of the coupling axis of the links, on the change in the total normal reaction of the road on the rear wheels of the tractor was carried out. A refined calculation scheme for a tractor-trailer with a two-axle trailer is proposed, in which the tractive force and rolling resistance forces are applied directly to the drive wheel axles. This approach made it possible to obtain analytical dependencies that more accurately describe the redistribution of loads between the axles for different variants of the coupling axis location of the trailer link and the unit's driving modes.

Based on the equations of equilibrium of moments, it has been proven that when aggregated with a two-axle trailer, the vertical load on the rear wheels of the tractor can either increase or decrease. The conditions under which an increase in the total normal reaction of the road on the rear wheels is ensured have been determined, namely, the placement of the coupling axis of the links above the axis of the rear wheels of the tractor. In the opposite case, a decrease in load is observed, which leads to a deterioration in the stability of the tractor pull against folding and a decrease in operational safety.

The results obtained are of great practical importance for the design, selection, and modernization of trailer devices for wheeled tractors with an articulated frame, as well as for improving the safety and efficiency of their operation in real working conditions.

Keywords: wheeled tractor, articulated frame, trailer link, stability of movement, center of mass, traction force

Подригало Михайло Абович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, завідувач кафедри технології машинобудування та ремонту машин; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1624-5219>; e-mail: pmikhab@gmail.com

Краснокутський Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харківський національний автомобільно-дорожній університет; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>; e-mail: hvukvn62@gmail.com.

Стаття подана 22.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-61-66>

УДК 631.319

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТУКОВОЇ МАШИНИ З ВІДЦЕНТРОВИМИ РОБОЧИМИ ОРГАНАМИ

Фесенко Г.В., Мелконов Г.Л., Боровік П.В.

INCREASING THE EFFICIENCY OF A FAT MACHINE WITH CENTRIFUGAL WORKING BODIES

Fesenko H.V., Melkonov H.L., Borovik P.V.

Застосування мінеральних добрив при вирощуванні сільськогосподарських культур призводить поряд з підвищенням їх врожайності, також до поліпшення якості виробленої продукції. Водночас ефективність застосування мінеральних добрив в значній мірі залежить від рівномірності їх розподілу в ґрунті, зокрема при поверхневому їх внесенні. Проведеними аналітичними дослідженнями виявлено, що тукові машини з відцентровими робочими органами допускають внесення мінеральних добрив з підвищеною нерівномірністю, що призводить до недобору врожаю сільськогосподарських культур. Крім того, ударна взаємодія гранул мінеральних добрив із лопатками відцентрового диску під час його обертального руху, призводить до руйнування гранул добрив з утворенням пиловидної фракції, яка поряд із погіршенням рівномірності їх внесення, призводить до забруднення навколишнього середовища. Також встановлено, що, причиною підвищеної нерівномірності внесення мінеральних добрив такими відцентровими робочими органами є те, що з віддаленням від тукової машини кількість добрив на одиницю площі поступово зменшується. Підвищити рівномірність поверхневого внесення мінеральних добрив, в технологічних процесах вирощування сільськогосподарських культур а отже і ефективність їх застосування можливо шляхом регульованого їх розподілу в ближні і дальні зони розсіву. Для цього у відцентровому робочому органі лопатки слід встановити рухомо на пружному стрижні таким чином, щоб при відхиленні лопатки в стрижні накопичувалась потенціальна енергія. Крім того, лопаткам слід задати регульований характер безвідривного обертового руху, наприклад, шайбою з внутрішньою профільною робочою поверхнею, із можливістю призупинення лопатки при її заповненні мінеральним добривом. Водночас кожну лопатку відцентрового диску обладнати

пальцем, спрямованим в сторону профільної поверхні шайби, в якому у виконаному прорізі вільно встановити на осі ролик таким чином, щоб вісь його симетрії була співвісна з віссю симетрії стрижня лопатки. Крім того, стрижні слід наділити пристроєм для зміни їх крутного моменту при зміні умов внесення мінеральних добрив туковою машиною з таким відцентровим робочим органом. Виконання відцентрового робочого органу в такому вигляді при його застосуванні створюються умови регульованого розподілення мінеральних добрив по ширині захвату тукової машини, внаслідок чого забезпечується рівномірне їх внесення без утворення пиловидної фракції, а отже і підвищення ефективності застосування такого відцентрового робочого органу.

Ключові слова: машина, мінеральні добрива, відцентровий диск., ефективність, профіль.

Вступ.

Вирощування сільськогосподарських культур тісно пов'язано із використанням ними поживних речовин, що призводить до зниження родючості ґрунту, відновлення якого забезпечується внесенням різних видів добрив, в тому числі і мінеральних промислового походження. Для поверхневого внесення мінеральних добрив застосовують в більшості випадків тукові машини як вітчизняних так і зарубіжних виробників з відцентровими робочими органами, до яких відносяться такі машини як МТТ-4У, РМД-6, РМД-8 та інші, зарубіжні: Amazone ZG-B 8200, Amazone ZG-TS та інші, які допускають внесення добрив з перевищенням агротехнічних вимог [1]. В результаті структурного аналізу

Під час внесення таким відцентровим робочим органом в складі машини мінеральних добрив, приведений в обертовий рух шків 5 через вал 4 та маточину 6 передає свій рух сегментам 8 із пальцями 9. В цей час пальці 9, притиснуті під дією пружин 19 до робочої поверхні відбивача 3, копіюють її профіль у безвідривному режимі, в результаті чого сегменти 8 повертаються відносно своєї осі 7, сповільнюючи свій рух із закручуванням своєї пружини 10. Водночас в пружині 10 відбувається накопичення потенціальної енергії (E_n), величина якої залежить від жорсткості (c) пружини і зміщення пружини лопаткою від її первісного стану [5]:

$$U_n = \frac{c \cdot (\Delta x)^2}{2}, Дж$$

Надходження мінеральних добрив на сегменти 8 відбувається з початком їх призупинення випуклою частиною поверхні відбивача 3. Після сходження пальців 9 із відбивача 3, сегменти 8 із добривом, починають рухатись із прискоренням під дією моменту сили від закрученої пружини 10. Водночас добрива, під дією на них відцентрової сили, починають сходити із сегментів 8 у відповідності із характером наростаючої колової швидкості від дії на них відцентрової сили. При цьому потенціальної енергії закрученої пружини 10 повинно бути достатньо для розсіву сегментом 8 її добрива. Звільнені від добрива сегменти 8 і діючої на них сили пружини, сповільнюють свій рух дією на них профільної поверхні відбивача 3 на пальці 9, і процес роботи такого відцентрового робочого органу продовжується.

Разом з тим в такому відцентровому робочому органі із збільшенням маси заповнених сегментів, що має місце при збільшенні дози внесення мінеральних добрив, сила притискування їх пальців до випуклості шайби виявилась недостатньою для переміщення пальців в безвідривному режимі. Внаслідок цього порушується заданий характер розсівання лопаткою добрив, що позначається на рівномірності їх внесення.

В результаті подальших творчих досліджень винайдений відцентровий робочий орган для розсіювання мінеральних добрив та інших сипких матеріалів наділений підвищеною пристосованістю до змін умов роботи за рахунок застосування пружних стрижнів з механізмом їх скручування відносно маточини [6] (рис. 2).

Характерною ознакою такого відцентрового робочого органу є те, що із зміною маси добрива на лопатці 12 при зміні умов роботи, змінюється і діюча на неї сила шляхом зміни пружності стрижня 8 механізмом 9. Внаслідок цього забезпечується стабільність якісних показників внесення мінеральних добрив при зміні умов роботи, що підвищує ефективність такого відцентрового робочого органу. Водночас в такому відцентровому робочому органі переміщення вільних кінців пальців по профільній поверхні шайби відбувається із ковзанням, на подолання виникаючої при цьому сили тертя ковзання витрачається значна механічна енергія [7].

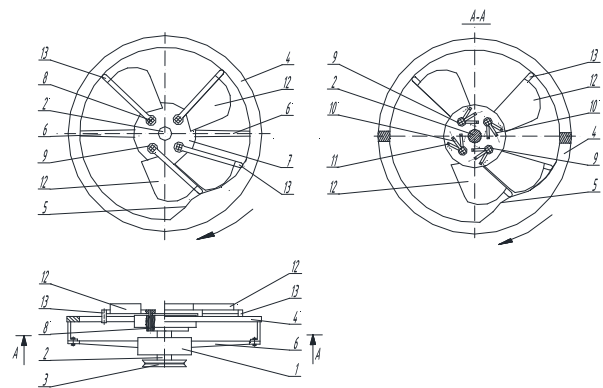


Рис. 2. Відцентровий робочий орган для розсіювання мінеральних добрив та інших сипких матеріалів:

- 1 – корпус; 2 – вал привідний; 3 – шків; 4 – шайба;
- 5 – випуклість шайби; 6 – пристрій; 7 – маточина;
- 8 – стрижень; 9 – механізм скручування стрижнів;
- 10 – важіль; 11 – фіксатор; 12 – лопатка сегментна;
- 13 – палець

Підвищити ефективність такого відцентрового робочого органу можливо шляхом зниження витрат механічної енергії на переміщення сегментних пальців по профільній поверхні шайби. Для цього у сегментних пальцях відцентрового робочого органу зі сторони протилежної від їх кріплення до лопатки, слід виконати повздовжній паз, який повинен бути звернутий до профільної поверхні шайби. Водночас у виконаному пазі встановити ролик на циліндричному стержні таким чином, щоб вісь симетрії ролика була співвісна із повздовжньою віссю симетрії стрижня.

Під час внесення мінеральних добрив таким відцентровим робочим органом в складі тукової машини, обертний рух від шківів 3 і валу 2 з маточиною 7 передається стрижням 8, які в свою чергу передають обертний рух і зусилля від своєї пружності сегментним лопаткам 12 з пальцями 13, які через циліндричні стержні 16 передають його своїм роликam 15 в пазі 14. В результаті того, що вісь симетрії стрижня 16 співвісна з повздовжньою віссю симетрії стрижня 8 кожної лопатки 12, відбувається безвідривне перекошування роликів 15 по профільній поверхні шайби 4 без проковзування, а отже і з пониженими витратами енергії. З початком переміщення ролика 15 пальця 10 по випуклості 5 профільної поверхні шайби 4, лопатка 12 відхиляється від свого попереднього положення з одночасним призупиненням свого обертного руху. При цьому лопатка 12 закручує свій стрижень 8, внаслідок чого в ньому відбувається пружне кутове зміщення з накопиченням потенціальної

енергії. В цей час на призупинену лопатку 12 поступає сипкий матеріал і з початком сходження ролика 15 з випуклості 5, лопатка 12 із сипким матеріалом під дією сили пружності закрученого її стрижня 8 починає рухатись із прискоренням. При сходженні із випуклості 5 лопатки 12, під дією на неї моменту від сили пружності закрученого стрижня 8, лопатка 12, використовуючи накопичену в стрижні 8 потенціальну енергію, розсіває мінеральні добрива з підвищено рівномірністю. В цей час до випуклості 5 підходить наступна лопатка 12 і робочий процес внесення мінеральних добрив продовжується.

Кінематичний аналіз такого відцентрового робочого органу показав, що зусилля що передається на лопатку від стрижня залежить від величини його закручування під час призупинення лопатки виступом профільної поверхні шайби. При цьому крутний момент, що виникає в стрижні, лежить в площині його поперечного перерізу і співпадає обертним рухом лопатки. У відповідності із законом Гука, кут закручування (φ) стрижня пропорційний його довжині (l) і крутному моменту (T), що при цьому виникає, можна визначити за наступною залежністю:

$$\varphi = \frac{T \cdot l}{G \cdot I_p}, \text{ рад}$$

де G – модуль зсуву, Н;

I_p – геометричний полярний момент інерції стрижня, м^2 .

Водночас добуток GI_p , як жорсткість стрижня, характеризує його властивість створювати на лопатці відповідне зусилля при скручуванні.

Разом з тим важливою умовою забезпечення заданої дальності польоту часток добрив є наявність у стрижня необхідної потенціальної енергії (U_n) деформації, яка залежить від крутного моменту (T):

$$U_n = \frac{T^2 \cdot l}{2G \cdot J_p}$$

У відповідності із законом збереження механічної енергії, кінетична енергія (U_k), що витрачається лопаткою при розсіві порції добрива прирівнюється потенціальній енергії накопиченої в стрижні при його скручуванні, за умови відсутності посторонніх сил [8]:

$$U_k = U_n$$

При цьому кінетична енергія (U_k) обертального руху лопатки з добримом залежить від її моменту інерції (I) і кутової швидкості (ω):

$$U_k = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2, \text{ Дж}$$

Важливим технологічним показником при внесенні мінеральних добрив таким відцентровим робочим органом є швидкість обертального руху лопаток, від якого залежить дальність польоту часток добрив. Після підстановки відповідних значень у формулу (3), кутова швидкість обертального руху лопатки визначається:

$$\omega = \sqrt{\frac{T^2 \cdot l}{G \cdot I_p \cdot I}} \text{ рад/с.}$$

В отриманій залежності на кутову швидкість обертального руху лопатки відцентрового робочого органу в найбільшій мірі впливає крутний момент (T) на пружному стрижні, а також його жорсткість.

Висновки. У результаті проведених аналітичних досліджень конструктивно-кінематичних параметрів відцентрових робочих органів тукових машин виявлено низку суттєвих недоліків, які обмежують їх технологічні можливості та знижують ефективність процесу поверхневого внесення мінеральних добрив. Зокрема встановлено, що традиційні конструкції не забезпечують необхідної рівномірності розподілу добрив по ширині захвату, супроводжуються підвищеними ударними навантаженнями на гранули та мають значні енергетичні втрати, зумовлені тертям у зонах взаємодії робочих елементів.

На основі виявлених недоліків розроблено та запропоновано нові технічні рішення відцентрових робочих органів із покращеними технологічними можливостями, які спрямовані на підвищення рівномірності розсіювання мінеральних добрив, зменшення руйнування гранул і стабілізацію параметрів їх руху. Запропоновані конструктивні зміни передбачають використання рухомих лопаток, встановлених на пружних стрижнях, що створює передумови для керованого накопичення та подальшого використання потенціальної енергії пружної деформації.

У процесі теоретичних досліджень отримано аналітичні залежності, які дають

змогу визначити величину накопиченої потенціальної енергії в пружному стрижні, необхідної для її перетворення в кінетичну енергію прискореного руху лопатки разом із порцією мінерального добрива. Також встановлено закономірності зміни кутової швидкості лопатки з урахуванням варіації жорсткості пружного стрижня, геометричних і масових характеристик лопатки, параметрів відцентрового диска та режимів роботи тукової машини при зміні умов внесення добрив. Отримані аналітичні залежності дозволяють обґрунтовано вибирати конструктивні та кінематичні параметри відцентрового робочого органу з метою забезпечення стабільного та прогнозованого процесу розсіювання добрив у ближній і дальній зонах розкиду. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню рівномірності внесення та зменшенню втрат поживних речовин.

У цілому підвищення ефективності запропонованого відцентрового робочого органу досягається також за рахунок заміни сили тертя ковзання, що виникає під час контакту пальців лопаток із профільною робочою поверхнею шайби, на силу тертя кочення. Відомо, що сила тертя кочення є значно меншою порівняно з силою тертя ковзання, що дозволяє істотно знизити енергетичні витрати, зменшити зношування контактних поверхонь та забезпечити плавність руху лопаток. У результаті створюються умови для підвищення надійності, довговічності та загальної ефективності роботи відцентрового робочого органу тукової машини.

Література

1. Ковтун Ю. І. Статистичні аспекти показників якості при механізованому внесенні добрив // Механізація та електрифікація сільського господарства : наук. праці. Полтава : РВВ ПДАА, 2007. Т. 6 (25). С. 65–68.
2. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини : підручник. Київ : Каравела, 2015. 552 с.
3. Сільськогосподарські та меліоративні машини. Агротехнічні вимоги до машин для підготовки і внесення добрив : підручник / Д. Г. Войтюк та ін. Київ : Вища освіта, 2004. С. 82–84.
4. Відцентровий робочий орган для розсіювання сипучих матеріалів : пат. 51807 Україна : МПК А01С 17/00. № 2000031501 ; заявл. 16.03.2000 ; опубл. 16.12.2002, Бюл. № 12. 4 с.
5. Антоненко І. І. Технічна механіка : навч. посіб. Кривий Ріг : КДПУ, 2016. С. 22–27.
6. Відцентровий робочий орган для розсіювання сипучих матеріалів : пат. 117438 Україна : МПК А01С 17/00. № а201709282 ; заявл. 21.09.2017 ; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14. 4 с.
7. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 75 с.
9. Коваленко В. Ф. Загальна фізика в прикладах, запитаннях і відповідях. Механіка : навч. посіб. Київ : Київський університет, 2011. 223 с.

References

1. Kovtun Yu. I. Statistical aspects of quality indicators in mechanized fertilizer application [Statystychni aspekty pokaznykiv yakosti pry mekhanizovanomu vnesenni dobryv]. Mechanization and Electrification of Agriculture: Scientific Works. Poltava: RVV PDAA, 2007. Vol. 6 (25). P. 65–68.
2. Voitiuk D. H., Havryliuk H. R. Agricultural machinery [Silskohospodarski mashyny]. Kyiv: Karavela, 2015. 552 p.
3. Voitiuk D. H., et al. Agricultural and reclamation machines. Agrotechnical requirements for machines for fertilizer preparation and application [Silskohospodarski ta melioratyvni mashyny. Ahrotekhnichni vymohy do mashyn dlia pidhotovky ta vnesennia dobryv]. Kyiv: Vyshcha Osvita, 2004. P. 82–84.
4. Centrifugal working body for spreading bulk materials [Vidtsentrovyy robochy organ dlia rozsiuvannia syppykh materialiv]. Patent UA No. 51807, IPC A01C 17/00. Application No. 2000031501; filed 16.03.2000; published 16.12.2002. Bulletin. No. 12. 4 p.
5. Antonenko I. I. Technical mechanics [Tekhnichna mekhanika]. Kryvyi Rih: KDPU, 2016. P. 22–27.
6. Centrifugal working body for spreading bulk materials [Vidtsentrovyy robochy organ dlia rozsiuvannia syppykh materialiv]. Patent UA No. 117438, IPC A01C 17/00. Application No. a201709282; filed 21.09.2017; published 25.07.2018. Bulletin. No. 14. 4 p.
7. Zakalov O. V. Fundamentals of friction and wear in machines [Osnovy tertia ta znoshuvannia v mashynakh]. Ternopil: TNTU named after I. Pului, 2011. 75 p.
8. Kovalenko V. F. General physics in examples, questions and answers. Mechanics [Zahalna fizyka v prykladakh, zapytanniakh i vidpovidiakh. Mekhanika]. Kyiv: Kyiv University, 2011. 223 p.

Fesenko H.V., Melkonov H.L., Borovik P.V. Increasing the efficiency of a fat machine with centrifugal working bodies.

The use of mineral fertilizers in the cultivation of crops leads, along with an increase in their yield, also to an improvement in the quality of the produced products. At the same time, the effectiveness of the use of mineral fertilizers largely depends on the uniformity of their distribution in the soil. in particular, when they are

applied superficially. The conducted analytical studies have revealed that fertilizer machines with centrifugal working bodies allow the application of mineral fertilizers with increased unevenness, which leads to a shortage of crop yields. In addition, the impact interaction of mineral fertilizer granules with the blades of the centrifugal disk during its rotational movement leads to the destruction of fertilizer granules with the formation of a dusty fraction, which, along with the deterioration of the uniformity of their application, leads to environmental pollution. It has also been established that the reason for the increased unevenness of the application of mineral fertilizers by such centrifugal working bodies is that with increasing distance from the fertilizer machine, the amount of fertilizers per unit area gradually decreases. It is possible to increase the uniformity of the surface application of mineral fertilizers in the technological processes of growing agricultural crops and, consequently, the efficiency of their application by means of their regulated distribution in the near and far sowing zones. To do this, in the centrifugal working body, the blades should be movably mounted on an elastic rod in such a way that when the blade is deflected, potential energy accumulates in the rod. In addition, the blades should be given a regulated nature of continuous rotational movement, for example, by a washer with an internal profile working surface, with the possibility of suspending the blade when it is filled with mineral fertilizer. At the same time, each blade of the centrifugal disk should be equipped with a finger directed towards the profile surface of the washer, in which a roller can be freely installed on the axis in the slot made in such a way that its axis of symmetry is

coaxial with the axis of symmetry of the blade rod. In addition, the rods should be equipped with a device for changing their torque when changing the conditions of applying mineral fertilizers by a fertilizer machine with such a centrifugal working body. The execution of the centrifugal working body in such a form when used creates conditions for regulated distribution of mineral fertilizers across the width of the fertilizer machine, as a result of which their uniform application is ensured without the formation of a dusty fraction, and therefore an increase in the efficiency of using such a centrifugal working body.

Key words: machine, mineral fertilizers, centrifugal disc., efficiency, profile.

Фесенко Григорій Васильович – к.т.н., доц., доцент кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ)

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

Боровік Павло Володимирович – д.т.н., доц., професор кафедри механізації сільського господарства, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ)

Стаття подана 15.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-67-71>

УДК 378.147:004

ANALYSING THE FEATURES OF CAD APPLICATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS

Davidenko N.O., Karpiuk L.V., Kobzarev Ye.V.

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ САПР В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ

Давіденко Н. О., Карпюк Л. В., Кобзарев Є. В.

The high dynamism of all social processes and phenomena determines the formation of a new worldview system for humanity, the modification of the hierarchy of needs and values and challenges to the pace and quality of development. Solving highly complex tasks related to meeting modern requirements demands the use of the latest scientific solutions and tools. Therefore, robotics, automation, and digitalization, which are based on advanced intellectual technologies, are considered to be the driving forces behind the innovative and technological structure. Humanity also has to solve a number of complex problems related to ecology, the search for new sources of energy, materials, and technologies that are acceptable to society. High information technologies play a decisive role in solving these problems. Among information technologies, design automation occupies a special place in the educational process. Firstly, design automation is a discipline that incorporates many other modern information technologies. For example, the technical support for computer-aided design (CAD) systems is based on the use of computer networks and telecommunications technologies, and CAD uses personal computers and workstations. The mathematical support of CAD systems is distinguished by the richness and diversity of methods of computational mathematics, statistics, mathematical programming, discrete mathematics, and artificial intelligence. CAD software packages are among the most complex modern software systems based on operating systems, complex programming languages, and other modern CASE technologies. Secondly, knowledge of the basics of design automation and the ability to work with CAD tools are necessary for virtually any future design engineer. This article examines the issues and problems students encounter when studying high-tech disciplines. In today's environment, higher education institutions (HEIs) need a high-quality and technologically advanced new approach to training students at different levels of

education. The introduction of high-tech disciplines into teaching allows for the rapid development and offering of a variety of individual assignments on a wide range of topics to students, taking into account their initial level of computer literacy. With the right approach, CAD can be an excellent basis for introducing project-based learning into the educational process. In addition, the use of automated design systems in the educational process, along with solving the main task, provides a number of additional educational effects. The combined effect of these factors significantly improves learning outcomes. This article discusses some of the distinctive features of CAD that have a positive impact on the effectiveness of training modern specialists.

Keywords: design, technical specifications, mathematical model, methods, modeling, cognitive process.

Introduction. The last few decades have been marked not only by the rapid development of computer technology, but also by the emergence and subsequent rapid development of a new field of knowledge based on it, which is now commonly referred to as IT technologies. IT technologies are widely used in the educational process at higher education institutions: electronic textbooks, multimedia systems, computer programs, knowledge control systems, distance learning systems, and much more. Along with the above-mentioned tools, so-called computer-aided design (CAD) systems, which are packages of application-oriented programs, are increasingly being used for educational design purposes. The issue of their application in the educational process deserves close attention, since in manufacturing, the results

of implementing the latest CAD-based technologies in the design of the most complex products have long proven their advantages over traditional methods.

Nowadays, no major development in mechanical engineering, energy, or electronics can do without automated design systems. The term «CAD» itself has become synonymous with characteristics such as high precision and high design speed. In these conditions, there is an obvious need for some adjustments to university educational programs. Currently, the most important competencies of university graduates in engineering specialties and training areas include the ability to use application software packages for device analysis and synthesis [1].

In addressing this issue, universities today face a number of serious challenges related to insufficient material resources (lack of powerful computers, high cost of licensed software, etc.). However, a number of large CAD software companies offer (free) «cut-down» student versions of CAD software, which can be a great help in learning.

Studying modern CAD systems and acquiring skills in working with them will undoubtedly contribute to improving the quality of engineering training, significantly reduce the time needed for young specialists to adapt to the workplace after graduating from university, and significantly increase their demand among employers. In addition, the use of computer-aided design systems in the educational process, along with solving the main task formulated above, provides a number of additional educational effects, the combined effect of which significantly improves learning outcomes. Let us consider some of the distinctive features of CAD that have a positive impact on the effectiveness of training modern specialists.

Presentation of the main material.

System for designing systems. According to definition [2], CAD is a set of tools and methods for automated design. It includes several components (subsystems) called technical, mathematical, software, linguistic, information, methodological, and organizational support. It is important to note that CAD is a «human-machine» system. The team of developers is part of the design system that performs design work in interaction with a computer. This feature of CAD most naturally contributes to the development of teamwork skills in students, which is one of the most important requirements of educational standards.

It is very important that all CAD systems are designed for designing not individual parts or components, but the entire system as a whole. Thus, when starting to work with CAD, students gain an understanding of the most complex manufacturing process of design from the very first step. He learns to draw up technical specifications, familiarizes himself with the design features of the future system, draws up drawings, selects materials and components for its implementation, etc. CAD systems allow you to simulate the operation of equipment and have tools for analyzing the processes occurring in the model. This provides students with the opportunity to analyze results interactively, compare them with technical specifications, and make adjustments to the initial data if necessary. At the same time, students are engaged in real creative engineering work. The intermediate and final results of CAD are calculated taking into account the interaction of individual elements of the designed system, thereby contributing to the most important process of synthesizing the knowledge acquired by the student in the early stages of training. The synthesis of fragmented knowledge instills a systematic approach that is so necessary for the developer of complex technology.

Project-based learning. With the right approach, CAD can be an excellent basis for introducing project-based learning into the educational process [3]. The essence of this approach is that the teacher sets the initial data and formulates the planned results of the learning task. Students set their own intermediate tasks, look for ways to solve them, and, while working on the project, compare the results obtained with the required ones and, if necessary, adjust the parameters. As a result, they acquire the skills to independently «acquire» new knowledge, learn to apply it to solving practical problems, and gain their first experience in research work.

The role of the teacher in such a situation boils down to guidance, counseling, and correction. At the same time, the requirements for teacher qualifications when working with the project method are extremely high. Nowadays, it is no longer sufficient to require teachers to have knowledge and experience working with CAD, or the ability to act as a coach who plays. Their role is much more complex. The fact is that this teaching method involves breaking the traditional sequence of studying the didactic units of the course. Students have the opportunity to independently formulate learning tasks for themselves in accordance with the specifics of the project, plan and solve them in the

sequence necessary for its implementation. At the same time, there is a risk of «missing» important sections of the course. There are other risks. For example, it is unacceptable for a student to master the rules of using CAD without learning the design methods programmed into the system. Therefore, the introduction of a project-based learning method based on the use of modern CAD systems can yield progressive results, but requires a very balanced approach and the participation of highly qualified teachers.

Mathematical models and CAD capabilities.

When studying physical or engineering disciplines, mathematical descriptions of processes often encounter significant difficulties in understanding the results obtained and physically interpreting expressions and formulas. In these cases, numerical (computer) modeling comes to the rescue. The model allows not only to perform the calculation part, but also to correctly interpret the results obtained and gain a deeper understanding of the processes being studied. From an educational point of view, the process of creating such mathematical (obtaining formulas, developing algorithms) and computer (writing and debugging programs) models is one of the most important and effective stages in studying the discipline. Unfortunately, it is rarely possible to set students the task of developing a serious model, as the curriculum does not always provide the necessary number of hours for this work. Teachers who choose this approach are forced to take drastic measures, reducing the scope of the task and using approximate methods to solve the problem. In these cases, it is advisable to consider using commercial software as CAD. Working with it does not require any effort to develop a model; students only need to learn the rules of operation. This will allow them to focus on the design process, on studying and analyzing the results obtained, and, possibly, on the procedure for optimizing the solution obtained.

At the same time, working with CAD has its «dark» side. Without being directly involved in creating a mathematical model, students only get a rough idea of its features and how to solve problems. Usually, their work boils down to correctly describing (computer drawing) the designed product. After that, the necessary CAD operations are performed automatically. As a result, there is a risk of superficial mastery of the theoretical foundations of the discipline. However, the effort saved in creating the model allows you to go much further in the project development process.

When analyzing the possibilities of applying CAD in the educational process, it is worth

remembering that the first attempts to automate design processes often encountered obstacles related to insufficient computing resources (low computing speed, small amounts of RAM, primitive interface). These limitations forced CAD developers to create systems based on more primitive models that used approximate methods to describe the designed products. That is why, initially, such systems did not differ much from educational models.

The rapid pace of development in computing technology gradually allowed restrictions on the degree of design automation to be lifted. Increased speed, greater «power» of automated design systems, and expansion of their capabilities are not the only and most important results of progress in IT technology. The most important result was the possibility to start creating CAD systems based on more advanced mathematical models that most adequately describe complex physical processes, taking into account numerous connections, material properties and their changes during operation, environmental impact, etc. As a result, the improvement of models and CAD systems based on them has led to an increase in the reliability of design results, while the development of tools for analyzing and optimizing the results obtained, as well as the creation of user-friendly interfaces, has dramatically increased the efficiency of designers' work.

The decision on how best to organize educational design—using CAD or based on simplified models created by students—should be made by the department. This decision requires a balanced approach, consideration of all the pros and cons, and places high demands on the qualifications of the teaching staff.

Returning to the learning process, it should be emphasized that working with CAD allows students to immerse themselves in an atmosphere close to the conditions of their future work in real production. The results of their projects will not be just abstract structural diagrams, formulas, and numbers, but specific device designs made from real elements and materials. CAD allows students to evaluate the performance characteristics of their designed devices in real conditions, including when external parameters change, to estimate the necessary production costs, etc. This is a significant step forward in training specialists to meet the demands of modern manufacturing. Aligning educational tasks with the needs and capabilities of production is a very pressing issue at present.

During the design process, students have the opportunity to conduct small-scale research aimed at finding the optimal solution.

Working with CAD as a cognitive process.

Educational design using CAD significantly expands cognitive capabilities. This is facilitated by the design mechanisms and display of results built into these systems. Virtually all modern automated design systems allow the visualization of complex physical processes that cannot be observed under normal conditions [4].

It should be noted that all CAD systems allow, after creating a spatial computer model, to examine it comprehensively, see the “invisible” side, study the details and components located inside the block, and better understand their mutual arrangement. In other words, the design system forms an adequate detailed image of the product being created.

Computer interactive modeling based on CAD as virtual laboratory work. The transition to new educational standards required a review of the ratio of classroom hours to independent study hours in favor of the latter. At the same time, it is obvious that reducing the number of laboratory classes in most disciplines will negatively affect the quality of training. A compromise could be to perform virtual analogues of laboratory work, which involve computer modeling [5]. CAD can also be a very useful tool in this case and form the basis for creating laboratory work. It is important to note that it can be organized remotely, which eliminates the need to install CAD on each student's computer.

Tool for increasing motivation to learn.

Teachers are encouraged to «develop independence, initiative, and creative abilities in their students». This is a difficult task. One of the most important conditions for its fulfillment is increasing students' motivation to study in their chosen field. Experience in organizing the educational process for both bachelor's and master's degree students demonstrates the positive role of CAD in increasing student interest in studying the subject. Work engages students in the most interesting process of creation with a computer and a «smart» automated design program in dialogue mode from the very first steps. This psychological feature must be taken into account at school age. It is no coincidence that the special term edutainment, which means acquiring knowledge through play, originated abroad and is becoming increasingly popular. In the vast majority of cases, such “adult play” contributes to increasing students' interest in their future profession.

The vast capabilities of CAD give students the confidence that they can tackle serious projects.

Indeed, if universities involved students extensively in fulfilling orders from enterprises for the development of new technology, students would feel like equal participants in the scientific research or experimental design work carried out by the university. Many would feel the need to be creative, to realize their own ideas and create their own developments. A number of US universities have a system in place to support such student initiatives and promote them on the market. In this case, the intellectual property belongs to the student and the university; the income from the sale of such developments accounts for a significant share of the university's budget.

Conclusions. The analysis of the features of applying automated design systems in the educational process is based on real experience in teaching a number of technical disciplines, which, according to modern terminology, can be attributed to the field of high technology. The results of the observation, although exhaustive, convincingly demonstrate a number of positive effects. The most valuable thing about them is the answer to the question of how to ensure that future bachelors and masters acquire a whole range of essential professional competencies, including both the competencies formulated in Ukrainian educational standards and the quality criteria for engineering education set out in the requirements of foreign and international accreditation organizations.

References

1. Standart vyshchoi osvity Ukrainy: druhyi (mahisterskyi) riven, haluz znan 15 Avtomatyzatsiia ta pryladobuduvannia 151 Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii. 2020 r.
2. Saienko S. Yu., Nechyporenko I. V. Osnovy SAPR : navch. Posibnyk. Kharkiv : KhDUKhT, 2017. 120 s.
3. Maliukh V. N. Vvedenye v sovremennye SAPR : Kurs lektsyi. / M.: DMK Press, 2010. 192 s.
4. Karpyuk L. V., Hulida M. I., Revenko S. A. Kompiuterna hrafika v mashynobudivnykh kreslenniakh : Navch. posibnyk. Luhansk: Vyd-vo Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 2007. 132 s.
5. Yevstifieiev V. O., Chorny O. P. Kompiuteryzovanyi informatsiino-metodychnyi kompleks navchalnoi dysypliny. Visnyk Kremenchutskoho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu. Kremenchuk: KDPU, 2006. Vyp. 3/2006(38). Chastyna I. S. 138 - 140.

Література

1. Стандарт вищої освіти України: другий (магістерський) рівень, галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. 2020 р.
2. Саєнко С. Ю., Нечипоренко І. В. Основи САПР : навч. посібник. Харків : ХДУХТ, 2017. 120 с.
3. Малюх В. Н. Введение в современные САПР : Курс лекций. / М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
4. Карпюк Л. В., Гуліда М. І., Ревенко С. А. Комп'ютерна графіка в машинобудівних кресленнях : Навч. посібник. Луганськ: Вид-во Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2007. 132 с.
5. Євстіфєєв В. О., Чорний О. П. Комп'ютеризований інформаційно-методичний комплекс навчальної дисципліни. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ, 2006. Вип. 3/2006(38). Частина 1. С. 138 - 140.

Давіденко Н. О., Карпюк Л. В., Кобзарев Е. В. Аналіз особливостей застосування САПР в освітньому процесі

Висока динамічність усіх суспільних процесів і явищ обумовлює формування нової системи світогляду людства, модифікацію ієрархії потреб і цінностей, викликів до темпів та якості розвитку. Вирішення надскладних завдань, пов'язаних із задоволенням вимог сучасності, вимагає застосування новітніх наукових рішень та інструментів. Відтак рушійними силами інноваційно-технологічного укладу визначають робототехніку, автоматизацію, цифровізацію, основою яких є високі інтелектуальні технології. Людству також доводиться вирішувати низку складних проблем, пов'язаних з екологією, пошуком нових джерел енергії, матеріалів, технологій, що відповідають суспільству. Визначальна роль у вирішенні названих проблем відводиться високим інформаційним технологіям. Серед інформаційних технологій автоматизація проектування займає особливе місце в освітньому процесі. По-перше, автоматизація проектування – дисципліна, її складовими частинами є багато інших сучасних інформаційних технологій. Так, технічне забезпечення систем автоматизованого проектування (САПР) засновано на використанні обчислювальних мереж і телекомунікаційних технологій, в САПР використовуються персональні комп'ютери і робочі станції. Математичне забезпечення САПР відрізняється багатством і різноманітністю методів обчислювальної математики, статистики, математичного програмування, дискретної математики, штучного інтелекту. Програмні комплекси САПР належать до числа найбільш складних сучасних програмних систем, заснованих на операційних системах,

складних мовах програмування і інших сучасних CASE-технологіях. По-друге, знання основ автоматизації проектування і вміння працювати із засобами САПР потрібні практично будь-якому майбутньому інженеру-розробнику. У даній статті розглядаються питання та проблеми навчання студентів, з якими вони зустрічаються під час вивчення високотехнологічних дисциплін. У вищих навчальних закладах (ВНЗ) в сучасних умовах потрібен новий підхід до підготовки студентів різних рівнів навчання – якісний, технологічний. Впровадження високотехнологічних дисциплін в навчання дозволяє досить швидко розробляти та пропонувати студентам різноманітні варіанти індивідуальних завдань за великою кількістю тем з урахуванням рівня початкової комп'ютерної підготовленості студентів. При правильному підході САПР може бути прекрасною основою запровадження у освітній процес проектного способу навчання. Крім того, використання у навчальному процесі систем автоматизованого проектування, поряд з рішенням основного завдання, дає низку додаткових освітніх ефектів. Сумарна дія таких ефектів багаторазово покращує результати навчання. В даній статті розглядаються деякі відмінні риси САПР, які позитивно впливають на результативність підготовки сучасного спеціаліста.

Ключові слова: проектування, технічне завдання, математична модель, методи, моделювання, когнітивний процес.

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземної філології та перекладу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenko11@gmail.com

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, karp224@gmail.com

Кобзарев Євген Володимирович – аспірант кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, asp-151-23-109@snu.edu.ua

Стаття подана 11.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-72-78>

УДК 666.3

ПРО БУДОВУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ СИСТЕМИ CaO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂

Пітак Я.М., Балаєв А.Д.

ABOUT THE STRUCTURE OF A MULTICOMPONENT SYSTEM CaO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂

Pitak Ya.M., Balaev A.D.

На основі сполук оксидної системи CaO -Fe₂O₃ - Al₂O₃ - SiO₂ розробляються високотемпературні вогнетривкі матеріали для металургії, енергетики та інших галузей. Оскільки такі матеріали використовують за високих робочих температур виникає зацікавленість у дослідженні реакцій в зазначеній системі за температур експлуатації до 1500 °С. До цієї оксидної системи також належать композиції алюмосилікатне волокно — базальтове волокно, які за рахунок високих теплоізоляційних властивостей, є перспективними для використання в чорній та кольоровій металургії, машинобудуванні, енергетиці та інших галузях. У зв'язку з цим викликає інтерес більш детальне теоретичне дослідження її субсолідусної будови. У роботі приведені результати розрахунку вільної енергії Гіббса для супряженої реакції в обраній багатоконпонентній системі. На основі проведених термодинамічних розрахунків встановлено можливість протікання супряженої реакції $CaAl_2Si_2O_8 + 3CaAl_2O_{19} + 17Fe_2O_3 = 2Ca_2Al_2SiO_7 + 17Fe_2Al_2O_6$, а також показано, що реакція між фазами Ca₂Al₂SiO₇ та Fe₂Al₂O₆ в інтервалі температур 300-1700 К не відбувається. Встановлено існування коноди Ca₂Al₂SiO₇ – Fe₂Al₂O₆ а комбінація фаз CaAl₂Si₂O₈ + CaAl₂O₁₉ + Fe₂O₃ в інтервалі температур 300-1500 К утворює між собою “порожній” трикутник. Наведено температурні інтервали співіснування комбінацій фаз та побудовано область системи Ca₂Al₂SiO₇-FeAlO₃-CaAl₂Si₂O₈-CaAl₂O₁₉-Fe₂O₃. За результатами проведених теоретичних досліджень встановлено, що розглянута багатоконпонентна система розбивається на 25 елементарних тетраедрів для яких наведено температури і склад евтектик. Побудовано топологічний граф взаємозв'язку елементарних тетраедрів, який в подальшому дасть можливість відслідковувати зміну фазового складу композицій. Проведено оцінку

відносного об'єму і температури появи розплаву в елементарних тетраедрах, визначено мінімальну температуру появи розплаву. Надані перспективні області системи придатні для виготовлення вогнетривких теплоізоляційних матеріалів. Проведені дослідження можуть бути застосовані при розробки та застосування вогнетривких матеріалів, наприклад в системах мулітокремнеземисте волокно -базальтове волокно. вогнетрив-шлак та інших.

Ключові слова багатоконпонентна система, супряжена реакція, вільна енергія Гіббса, елементарні тетраедри, топологічний граф взаємозв'язку елементарних тетраедрів, температура і склад евтектики

Вступ. Перспективи відновлення та розвитку в Україні металургії, енергетики, хімічної та інших галузей промисловості залежать від модернізації виробничих потужностей, кваліфікованого кадрового потенціалу, проведення наукових досліджень та впровадження їх у виробничі процеси. Це сприяє створенню конкурентоспроможних продуктів, що відповідають міжнародним стандартам. Пошук шляхів підвищення ефективності та економічності виробництва процесів і установок обумовлює необхідність створення та застосування сучасної ефективної теплової ізоляції [1,2]. Одним із найбільш ефективних видів високотемпературної теплоізоляції є вироби з базальтового [3] та мулітокремнеземистого волокон [4]. Виходячи з цього, розробка нових видів теплоізоляційних матеріалів з необхідними

експлуатаційними характеристиками є важливим завданням сучасної науки та практики у галузі матеріалознавства [1-4].

В даний час на основі сполук системи CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 створюють високотемпературні вогнетривкі матеріали для металургії, енергетики та інших галузей. Переважно такі матеріали використовують за високих робочих температур, тому виникає зацікавленість у дослідженні реакцій в зазначеній системі за температур експлуатації до 1500°C .

Чотирикомпонентна система CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 та її підсистеми вивчалися вченими з різних країн. Теоретичну будову системи CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 раніше представлено в роботі [5].

Метою роботи є детальне теоретичне дослідження субсолідусної будови оксидної системи CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 , розрахунок вільної енергії Гіббса для супряженої реакції в системі, взаємодії фаз при різних температурах, наявності та кількості в системі елементарних тетраедрів, їх взаємозв'язку, температури появи розплаву та визначення областей системи, придатних для виготовлення вогнетривких матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження. При вивченні багатокомпонентних систем слід враховувати можливість протікання супряжених реакцій. При цьому найчастіше виходить $\text{D} + \text{E} = \text{A} + \text{B} + \text{C}$, де фази А, В, С утворюватимуть «заповнений трикутник». Однак якщо попарно існуючі фази АВ, АС, ВС в потрібній комбінації даватимуть реакцію $\text{AB} + \text{AC} + \text{BC} = \text{D} + \text{E}$ (фази Д і Е в цьому випадку не реагують з парними фазами АВ, АС і ВС), контур АВС існуватиме, але він виявляється «порожнім», в свою чергу кількість елементарних тетраедрів збільшується з 2 до 3. Такий вид реакцій називається супряжений та без проведення термодинамічного аналізу, навіть за допомогою експериментальних перевірок, інколи виявляється непередбачуваним [5,6].

Розрахунки вільної енергії Гіббса проводили за методикою наведеною в [5,6,7], яка включає в себе наступну послідовність дій:

1. Визначаємо ентальпію реакції при 298 K за такою формулою:

$$\Delta H_{298\text{p}}^0 = \sum \Delta H_{298}^0 \text{ продуктів} - \sum \Delta H_{298}^0 \text{ вихідних речовин.} \quad (1)$$

2. Визначаємо ентропію реакції при 298 K за формулою

$$\Delta S_{298\text{p}}^0 = \sum S_{298}^0 \text{ продуктів} - \sum S_{298}^0 \text{ вихідних речовин.} \quad (2)$$

3. Визначаємо коефіцієнти рівняння залежності теплоємності від температури реакції, виражаючи його у вигляді $\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot T + \Delta c \cdot T^2$:

$$\Delta C_{p298}^0 = \sum C_{p298}^0 \text{ продуктів} - \sum C_{p298}^0 \text{ вихідних речовин.} \quad (3)$$

4. Підставляємо значення ΔH_{298}^0 і $\Delta C_p = f(T)$ у формулу для визначення ΔH_T^0 :

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT. \quad (4)$$

5. Знаючи ΔS_{298}^0 і $\Delta C_p = f(T)$, визначаємо ΔS_T^0 за формулою

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT. \quad (5)$$

6. Знаючи ΔH_T^0 і ΔS_T^0 , визначаємо ΔG_T^0 за формулою

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T \Delta S_T^0. \quad (6)$$

Для побудови поточних температур кривих ліквідуса Л.Ф.Епштейн та У. Х. Хауленд запропонували наближене рівняння [5,6]

$$T = \frac{T_i}{1 - \ln X_i / N_i} \quad (7)$$

де T – поточна температура кривої ліквідусу, K ; T_i – температури плавлення i -того компонента, K ; N_i – кількість атомів у формулі компонента (сполуки); X_i – мольна доля компонента (сполуки).

Для трикомпонентних систем в точці евтектики поточні температури кривих ліквідусу для всіх компонентів системи, що складають елементарний трикутник, рівні. Тому для оцінки температури евтектики та її складу в трикомпонентних системах нами запропоновано використовувати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{T_{пл.1}}{1 - \frac{\ln(X_1)}{N_1}} = \frac{T_{пл.2}}{1 - \frac{\ln(X_2)}{N_2}}; \\ \frac{T_{пл.2}}{1 - \frac{\ln(X_2)}{N_2}} = \frac{T_{пл.3}}{1 - \frac{\ln(X_3)}{N_3}}; \\ X_1 + X_2 + X_3 = 1, \end{cases} \quad (8)$$

де $T_{пл.1}$, $T_{пл.2}$, $T_{пл.3}$ – температури плавлення першого, другого та третього компонентів системи, К; N_1 , N_2 , N_3 – кількість атомів у формулі компонента (сполуки); X_1 , X_2 , X_3 – мольна доля компонента (сполуки).

Для чотирикомпонентних систем в точці евтектики поточні температури кривих ліквідусу для всіх компонентів системи, що складають елементарний тетраедр, рівні. Це дозволяє використовувати таку систему рівнянь для оцінки температури і складу евтектики в чотирикомпонентних системах:

$$\begin{cases} T_1 = \frac{T_{пл.1}}{1 - \ln X_1/N_1} = T_2 = \frac{T_{пл.2}}{1 - \ln X_2/N_2}; \\ T_2 = \frac{T_{пл.2}}{1 - \ln X_2/N_2} = T_3 = \frac{T_{пл.3}}{1 - \ln X_3/N_3}; \\ T_3 = \frac{T_{пл.3}}{1 - \ln X_3/N_3} = T_4 = \frac{T_{пл.4}}{1 - \ln X_4/N_4}; \\ X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 1, \end{cases} \quad (9)$$

де $T_{пл.1}$, $T_{пл.2}$, $T_{пл.3}$, $T_{пл.4}$ – температури плавлення першого, другого, третього та четвертого компонентів, К; N_1 , N_2 , N_3 , N_4 – кількість атомів у формулі відповідного компонента (сполуки); X_1 , X_2 , X_3 , X_4 – мольна доля компонента (сполуки).

Вивчення чотирикомпонентних (та багатокомпонентних) систем неможливе без використання барицентричних координат і евклідової геометрії. Так довжина коноди L в чотирикомпонентній системі між точками з координатами X_1 , Y_1 , Z_1 , T_1 і X_2 , Y_2 , Z_2 , T_2 визначається за формулою наведеною в [5,6]:

$$L^2 = (X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2 + (T_2 - T_1)^2 + (X_2 - X_1) \cdot (Y_2 - Y_1) + (X_2 - X_1) \cdot (Z_2 - Z_1) + (X_2 - X_1) \cdot (T_2 - T_1) + (Y_2 - Y_1) \cdot (Z_2 - Z_1) + (Y_2 - Y_1) \cdot (T_2 - T_1) + (Z_2 - Z_1) \cdot (T_2 - T_1) \quad (10)$$

Відносний об'єм елементарного тетраедра (V_4), беручи об'єм концентраційного тетраедра,

що дорівнює одиниці, визначається розв'язанням рівняння [5,6]:

$$V_4 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix}$$

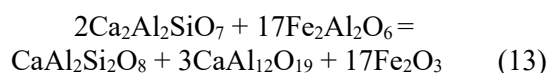
Коли система налічує 4 оксиди набуває істотного прикладного значення визначення сумарного відносного об'єму, у якому наявна дана фаза ($V_{фази}$) і ймовірність її існування ($W_{фази}$) (V_0 – об'єм концентраційного тетраедра):

$$V_{фази} = \sum V_i, \quad W_{фази} = \sum V_i / n \cdot V_0. \quad (11)$$

Ступінь асиметрії (K) елементарних тетраедрів оцінюються як відношення максимальної довжини ребра елементарного тетраедра (L_{max}) до мінімальної (L_{min}) [6]:

$$K = L_{max} / L_{min}. \quad (12)$$

Аналіз субсолідусної будови системи $CaO - Fe_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2$ наведеної в [8] показав, що за підвищених температур в цій системі також присутня супряжена реакція:



Для виявлення співіснування фаз та будови окремих областей системи необхідно провести термодинамічний аналіз цієї реакції. Вихідні термодинамічні константи для розрахунків наведено в табл.1 [6,7].

Таблиця 1

Термодинамічні константи сполук

№	Фаза	$-\Delta H_{298}^0$, кДж/ моль	S_{298}^0 , Дж/ (моль·град)	$C_p = a + b \cdot T + c \cdot T^{-2}$ Дж/(моль·град)		
				a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$
1	Fe_2O_3	822,15	89,96	98,28	77,82	14,85
2	$Fe_2Al_2O_6$	2525,46	143,09	180,50	224,18	-
3	$CaAl_{12}O_{19}$	10667,96	308,82	-	301,96	65,50
4	$Ca_2Al_2SiO_7$	3984,19	198,22	266,56	33,46	63,23
5	$CaAl_2Si_2O_8$	4220,89	202,41	269,40	57,30	70,63

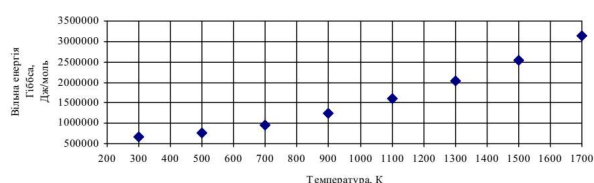
Залежність ентропії, ентальпії від температури наведена в табл.2

Таблиця 2

Залежність ентропії, ентальпії від температури

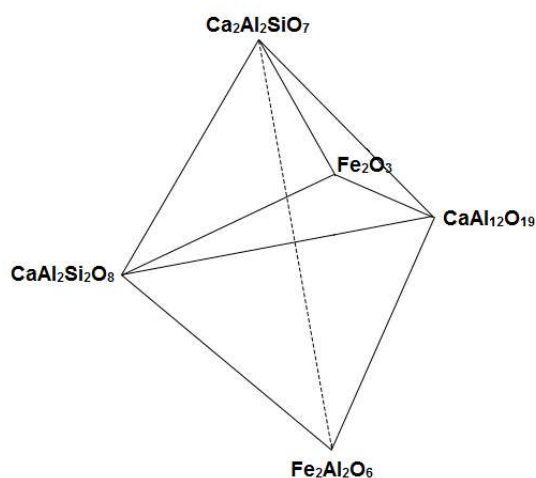
T	ΔH^0_t , Дж/моль	S^0_t , Дж / (моль·град)
300	607076	-179
500	374565	-771
700	108332	-1217
900	-211592	-1617
1100	-590654	-1996
1300	-1030948	-2364
1500	-1533450	-2722
1700	-2098679	-3076

Залежність вільної енергії Гіббса G^0_T від температури наведена в рис. 1.

Рис. 1. Залежність вільної енергії Гіббса G^0_T від температури

Аналіз таблиці 2 та рисунка 1 показав що $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ не реагує з $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6$, а комбінація фаз $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ утворює “порожній” трикутник. Таким чином область $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ системи $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ утворює 3 елементарних тетраедра (рис.2):

- 1) $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{CaAl}_{12}\text{Si}_2\text{O}_8$
- 2) $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{Fe}_2\text{O}_3$
- 3) $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{Fe}_2\text{O}_3$

Рис. 2. Елементарні тетраедри області $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} - \text{Fe}_2\text{O}_3$ системи $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

Система $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ складається з 25 елементарних тетраедрів характеристика яких наведена в табл.3.

Таблиця 3

Характеристики елементарних тетраедрів системи $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ($\text{CaO}-\text{C}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{F}$, $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{A}$, SiO_2-S)

№ елементарного тетраедру	Елементарні тетраедри				Об'єм елементарного тетраедру ΔV , %
	а	б	в	г	
1	C	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	33
2	C	C ₃ S	C ₂ F	C ₄ AF	32
3	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	11
4	C ₃ S	C ₂ S	C ₂ F	C ₄ AF	11
5	C ₂ S	C ₃ A	C ₁₂ A ₇	C ₄ AF	17
6	C ₂ S	C ₁₂ A ₇	CA	C ₄ AF	9
7	C ₂ S	C ₂ F	C ₄ AF	CF	11
8	C ₂ S	CA	CF	C ₄ AF	32
9	C ₂ S	CA	CF	CF ₂	23
10	C ₂ S	C ₂ AS	CA	CF ₂	44
11	C ₂ S	C ₂ AS	CF ₂	F	19
12	C ₂ S	C ₃ S ₂	C ₂ AS	F	26
13	C ₃ S ₂	CS	C ₂ AS	F	37
14	CS	C ₂ AS	CAS ₂	F	78
15	C ₂ AS	CA	CA ₂	CF ₂	34
16	C ₂ AS	CA ₂	CF ₂	F	25
17	C ₂ AS	CA ₂	CA ₆	F	29
18	C ₂ AS	FA	CAS ₂	CA ₆	70
19	C ₂ AS	FA	CAS ₂	F	52
20	CAS ₂	CA ₆	FA	A	22
21	A ₃ S ₂	CAS ₂	FA	F	22
22	A ₃ S ₂	CAS ₂	FA	A	32
23	A ₃ S ₂	CAS ₂	F	S	145
24	CS	CAS ₂	F	S	177
25	C ₂ AS	FA	CA ₆	F	7

Взаємозв'язок між елементарними тетраедрами системи $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ наведено нижче (е- залишок із 3 фаз елементарного тетраедра не повторюється в іншому елементарному тетраедрі).

1а — 36 7а — е 13а — 14в 19а — 21а 25а - е
 б — е б — 8б б — 12а б — 14а б - 17б
 в — 2в в — е в — е в — 25в в - 19в
 г — е г — 4а г — е г — 18г г - 18в

2а — 4б 8а — е 14а — 19б 20а — е
 б — е б — 7б б — 24г б — 22а
 в — 1в в — 6б в — 13а в — е
 г — е г — 9г г — е г — 18а

3а — 5в 9а — е 15а — е 21а — 19а
 б — 1а б — е б — 16г б — е
 в — 4в в — 10б в — 10а в — 23г
 г — е г — 8г г — е г — 22г

4а — 7г 10а — 15в 16а — е 22а — 20б
 б — 2а б — 9в б — 11а б — е
 в — 3в в — 11г в — 17в в — е
 г — е г — е г — 15б г — 21г

5а — е 11а — 16б 17а — е 23а — 24а
 б — 6в б — е б — 25б б — е
 в — 3а в — 12б в — 16в в — е
 г — е г — 10в г — е г — 21в

6а — е 12а — 13б 18а — 20г 24а — 23а
 б — 8в б — 11в б — е б — е
 в — 5б в — е в — 25г в — е
 г — е г — е г — 19г г — 14б

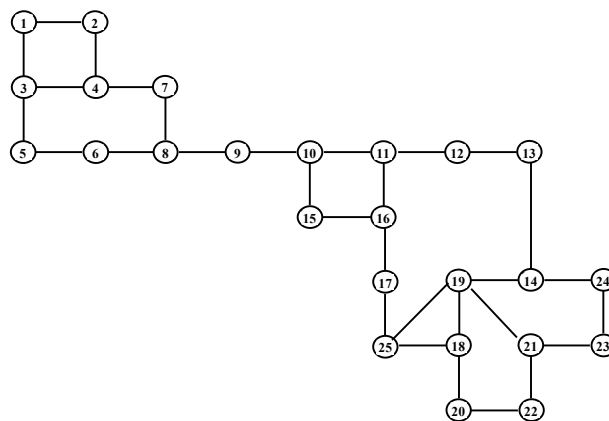


Рис. 3. Топологічний граф взаємозв'язку елементарних тетраедрів системи $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Топологічний граф взаємозв'язку елементарних тетраедрів наведено на рис.3.

Для елементарних тетраедрів визначено температуру і склад евтектики (табл.4).

В системі виявлено 6 внутрішніх конод, температура і склад евтектики яких наведена в табл. 5.

З табл. 4 та 5 випливає, що найбільш перспективними для технології вогнетривів і теплоізоляційних матеріалів є композиції в елементарних тетраедрах 18 ($\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$) та 22 ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13} - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$) і в перетинах 4 ($\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) та 5 ($\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)

Таблиця 4

Температура і склад евтектики елементарних тетраедрів системи $\text{CaO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ($\text{CaO}-\text{C}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{F}$, $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{A}$, SiO_2-S)

№ елементарного тетраеду	Фази елементарного тетраедра				Температура евтектики, К	Склад евтектики			
	а	б	в	г		а	б	в	г
1	C	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	1624	0,2083	0,0119	0,2876	0,4921
2	C	C ₃ S	C ₂ F	C ₄ AF	1589	0,1926	0,0089	0,4716	0,3268
3	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	1643	0,0140	0,0394	0,3325	0,6141
4	C ₃ S	C ₂ S	C ₂ F	C ₄ AF	1611	0,0107	0,0319	0,5365	0,4208
5	C ₂ S	C ₃ A	C ₁₂ A ₇	C ₄ AF	1641	0,0387	0,3254	0,0416	0,5943
6	C ₂ S	C ₁₂ A ₇	CA	C ₄ AF	1636	0,0376	0,0350	0,3628	0,5646
7	C ₂ S	C ₂ F	C ₄ AF	CF	1438	0,0091	0,1686	0,435	0,7787
8	C ₂ S	CA	CF	C ₄ AF	1446	0,0098	0,1269	0,8138	0,0495
9	C ₂ S	CA	CF	CF ₂	1329	0,0035	0,0570	0,4309	0,5087
10	C ₂ S	C ₂ AS	CA	CF ₂	1390	0,0061	0,0165	0,0881	0,8893
11	C ₂ S	C ₂ AS	CF ₂	F	1366	0,0049	0,0124	0,7183	0,2643
12	C ₂ S	C ₃ S ₂	C ₂ AS	F	1568	0,0241	0,2755	0,1027	0,5976
13	C ₃ S ₂	CS	C ₂ AS	F	1497	0,1459	0,3432	0,0519	0,4590
14	CS	C ₂ AS	CAS ₂	F	1514	0,3675	0,0613	0,0814	0,4898
15	C ₂ AS	CA	CA ₂	CF ₂	1391	0,0166	0,0882	0,0038	0,8915
16	C ₂ AS	CA ₂	CF ₂	F	1367	0,0125	0,0028	0,7201	0,2646
17	C ₂ AS	CA ₂	CA ₆	F	1639	0,1893	0,0537	0,0001	0,7569
18	C ₂ AS	FA	CAS ₂	CA ₆	1703	0,3173	0,2265	0,4559	0,0004
19	C ₂ AS	FA	CAS ₂	F	1583	0,1169	0,0947	0,1601	0,6284
20	CAS ₂	CA ₆	FA	A	1728	0,5542	0,0007	0,2665	0,1785
21	A ₃ S ₂	CAS ₂	FA	F	1608	0,0008	0,2011	0,1145	0,6835
22	A ₃ S ₂	CAS ₂	FA	A	1727	0,0056	0,5511	0,2653	0,1780
23	A ₃ S ₂	CAS ₂	F	S	1526	0,002	0,0922	0,5128	0,3948
24	CS	CAS ₂	F	S	1444	0,2747	0,0384	0,3713	0,3156
25	C ₂ AS	FA	CA ₆	F	1620	0,1618	0,1258	0,0001	0,7123

Таблиця 5

**Внутрішні коноди системи
CaO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂**

Конода	Т евт., К	1 комп., мол. %	2 комп., мол. %
Fe ₂ O ₃ – Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	1652	0,789	0,211
Fe ₂ O ₃ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	1634	0,746	0,254
caFe ₄ O ₇ – Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	1402	0,981	0,019
Fe ₂ Al ₂ O ₆ – CaAl ₂ Si ₂ O ₈	1754	0,317	0,683
Fe ₂ Al ₂ O ₆ – Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	1791	0,397	0,603
Ca ₂ SiO ₄ – Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	1683	0,050	0,950

Висновки. В системі CaO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ встановлено можливість протікання супряженої реакції $2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 17\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 3\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19} + 17\text{Fe}_2\text{O}_3$. Встановлено що в інтервалі температур 300–1700К Ca₂Al₂SiO₇ не реагує з Fe₂Al₂O₆, а комбінація фаз CaAl₂Si₂O₈ + CaAl₁₂O₁₉ + Fe₂O₃ утворює “порожній” трикутник. В системі CaO – Fe₂O₃ – Al₂O₃ – SiO₂ встановлено 25 елементарних тетраедрів для яких наведено температури і склад евтектик. Побудовано топологічний граф взаємозв’язку елементарних тетраедрів який в подальшому дасть можливість відслідковувати зміну фазового складу композицій: наприклад вогнетрив-шлак, мулітокремнеземисте волокно-базальтове волокно та інших. Проведено оцінку відносного об’єму і температури появи розплаву в елементарних тетраедрах і надано перспективні області складів для технології вогнетривких матеріалів. Отримані дані слід враховувати в подальшому при дослідженні композицій на основі базальтового волокна та мулітокремнеземистого волокна.

Л и т е р а т у р а

1. Мазур В.В. Розвиток технології виробництва теплоізоляційних матеріалів для використання в металургії та машинобудуванні. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31, № 4. С. 59–63. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.07>
2. Павленко А.М., Чейлітко А.О., Носов М.А. Композиційна високопориста теплова ізоляція з ефективними параметрами пористості. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016, № 42. С. 92–96. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2016.42.15>

3. Джигірис Д.Д., Махова М.Ф. Основи виробництва базальтових волокон та виробів. Київ : Теплоенергетик, 2002. 416 с.
4. Мазур В.В. Застосування вогнетривів із мулітокремнеземистого волокна — ефективний засіб теплоізоляції і енергозбереження в металургії. *Литво. Металургія*. 2025 : матеріали XXI Ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції (27–29 травня 2025 р., м. Харків-м. Київ) / НТУ «ХПІ». Харків, 2025. С.180–181. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/93177>
5. Бережний А.С. Фізико-хімічні системи тугоплавких, неметалічних і силікатних матеріалів : Навчальний посібник. Київ : НМК ВО, 1992. 172с.
6. Хімічна технологія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах : навч. посіб. у 2 ч. Ч.2. Фізико-хімічні системи, фазові рівноваги, термодинаміка, ресурсо- та енергозбереження в технології ТНСМ / О.Ю. Федоренко, Я.М. Пітак, та ін.; за ред.М. І. Рищенко. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. 336 с.
7. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов : под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна. Москва : Стройиздат, 1986. 408 с.
8. Бережной А.С. Многокомпонентные системы окислов. Киев : Наукова думка, 1970. 544 с.

References

1. Mazur V.V. Rozvytok tekhnolohii vyrobnytstva teploizoliatsiinykh materialiv dlia vykorystannia v metalurhii ta mashynobuduvanni. *Metal ta lyttia Ukrainy*. 2023. T. 31, № 4. S. 59–63. URL: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.04.07>
2. Pavlenko A.M., Cheilitko A.O., Nosov M.A. Kompozitsiina vysokoporysta teplova izoliatsiia z efektyvnymy parametramy porystosti. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichniy instytut"*. Seria: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2016, № 42. S. 92–96. URL: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2016.42.15>
3. Dzhyhirys D.D., Makhova M.F. Osnovy vyrobnytstva bazaltovykh volokon ta vyrobiv. Kyiv : Teploenerhetyk, 2002. 416 s.
4. Mazur V.V. Zastosuvannia vohnetryviv iz mulitokremnezemystoho volokna — efektyvnyi zasib teploizoliatsii i enerhozberezhennia v metalurhii. *Lytvo. Metalurhiia*. 2025 : materialy XXI Yuvileinoi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (27–29 travnia 2025 r., m. Kharkiv-m. Kyiv) / NTU «KhPI». Kharkiv, 2025. S.180–181. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/93177>
5. Berezhnyi A.S. Fyzyko-khimichni systemy tuhoplavkykh, nemetalichnykh i sylikatnykh materialiv : Navchalnyi posibnyk. Kyiv : NMK VO, 1992. 172s.

6. Khimichna tekhnolohiia tuhoplavkykh nemetalevykh i sylykatnykh materialiv u prykladakh i zadachakh : navch. posib. u 2 ch. Ch.2. Fyzyko-khimichni systemy, fazovi rinvovahy, termodynamika, resurso-ta enerhozberezhennia v tekhnolohii TNSM / O.Yu. Fedorenko, Ya.M. Pitak , ta in.; za red.M. I. Ryshchenka. Kharkiv : NTU «KhPI», 2015. 336 s.
7. Babushkyn V.Y., Matveev H.M., Mchedlov-Petrosian O.P. Termodynamika sylykatov : pod red. O.P. Mchedlova-Petrosiana. Moskva : Stroiyzdat, 1986. 408 s.
8. Berezhnoi A.S. Mnohokomponentnye systemy okyslov. Kyev : Naukova dumka, 1970. 544 s.

Pitak Ya.M., Balaev A.D. About the structure of a multicomponent system $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

High-temperature refractory materials for metallurgy, energy and other industries are being developed based on compounds of the $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ oxide system. Since such materials are used at high operating temperatures, there is interest in studying the reactions in this system at operating temperatures up to 1500 °C. This oxide system also includes aluminosilicate fibre-basalt fibre compositions, which, due to their high thermal insulation properties, are promising for use in ferrous and non-ferrous metallurgy, mechanical engineering, energy and other industries. In this regard, a more detailed theoretical study of its subsolid structure is of interest. The paper presents the results of Gibbs free energy calculations for the conjugate reaction in the selected multicomponent system. Based on the thermodynamic calculations, the possibility of the conjugate reaction $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 3\text{CaAl}_2\text{O}_7 + 17\text{Fe}_2\text{O}_3 = 2\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 17\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ has been established. It was also shown that the reaction between the $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ and $\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ phases does not occur in the temperature range of 300-1700 K. The existence of $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Fe}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ conodes has been established, and the combination of phases $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CaAl}_2\text{O}_7 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ in the temperature range 300-1500 K forms an 'empty'

triangle between them. The temperature ranges of coexistence of phase combinations are given and the region of the $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\text{-FeAlO}_3\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{O}_7\text{-Fe}_2\text{O}_3$ system is constructed. The results of theoretical studies have established that the multicomponent system under consideration breaks down into 25 elementary tetrahedra for which the temperatures and compositions of eutectics are given. A topological graph of the interrelationship of elementary tetrahedra has been constructed, which will subsequently make it possible to track changes in the phase composition of the compositions. The relative volume and temperature of melt appearance in elementary tetrahedra were estimated, and the minimum temperature of melt appearance was determined. The promising areas of the system are suitable for the manufacture of refractory thermal insulation materials. The research can be applied in the development and use of refractory materials, for example in mullite-silica fibre-basalt fibre systems, refractory slag and others.

Keywords: multicomponent system, coupled reaction, Gibbs free energy, elementary tetrahedra, topological graph of elementary tetrahedra interrelationships, temperature and eutectic composition.

Пітак Ярослав Миколайович – д.т.н., професор, професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ "Харківський політехнічний інститут", pyarn11@ukr.net

Балаєв Антон Дмитрович – аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ "Харківський політехнічний інститут", balaevton@gmail.com

Стаття подана 13.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-79-87>

УДК 629.4.08:62-192

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛАНОВО-ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ З УРАХУВАННЯМ РИЗИКУ ВІДМОВ

Доля К.В.

OPTIMIZATION OF PLANNED AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF ROLLING STOCK TAKING INTO ACCOUNT THE RISK OF FAILURES

Dolia K.V.

У роботі розглянуто задачу підвищення ефективності планово-попереджувального технічного обслуговування (ППТО) рухомого складу шляхом переходу від жорстко фіксованих регламентних інтервалів до ризик-орієнтованого планування (Risk-Based Maintenance, RBM). Актуальність теми зумовлена одночасним зростанням вимог до безпеки та пунктуальності перевезень, старінням парку й підвищенням вартості простоїв, тоді як пропускна спроможність депо (пости, персонал, запасні частини) залишається обмеженою. У таких умовах однакові інтервали ТО для всіх одиниць техніки є компромісом: для частини рухомого складу вони надмірно консервативні та спричиняють зайві витрати, для іншої частини — створюють підвищену ймовірність відмов у русі. Ключова ідея RBM полягає в узгодженні періодичності та пріоритетів ППТО з ймовірністю відмови та наслідками відмови. Наслідки в залізничних системах мають багатокомпонентний характер і включають безпекові ефекти, експлуатаційні втрати (затримки, зрив графіка, зниження доступності парку) та економічні витрати (ремонт, простої, штрафи). Мета дослідження — запропонувати та обґрунтувати підхід до вибору міжремонтних інтервалів, який мінімізує очікувані сумарні втрати за забезпечення прийнятного рівня ризику. Методична основа роботи поєднує огляд сучасних концепцій ППТО, RCM, CBM і PdM/PHM із формалізацією задачі типу “витрати + ризик” на базі параметричних моделей надійності. Для кількісного опису деградації застосовано модель часу до відмови з розподілом Вейбулла, що дає змогу пов’язати інтервал ППТО T з ймовірністю відмови $F(T)$ та очікуваними витратами на планове й коригувальне втручання. На демонстраційному прикладі виконано розрахунок раціонального

інтервалу ППТО та проведено аналіз чутливості до співвідношення вартостей планових і аварійних робіт. Показано наявність області оптимальних (раціональних) інтервалів, у якій досягається компроміс між частотою планових робіт і втратами від відмов. Отримані результати можуть бути використані як підґрунтя для подальшої інтеграції з даними моніторингу стану (CBM/PdM) та для розширення постановки шляхом введення явних обмежень на ризик і ресурсних обмежень депо.

Ключові слова: рухомий склад, технічне обслуговування, планово-попереджувальне ТО, ризик відмов, надійність, розподіл Вейбулла, RCM, CBM, PdM.

Вступ. Надійність та доступність рухомого складу безпосередньо визначають стійкість перевізного процесу: виконання графіка руху, оборот поїздів, використання пропускної спроможності дільниць і якість сервісу для вантажних та пасажирських перевезень. У сучасних умовах вимоги до безпеки та пунктуальності зростають, тоді як експлуатація часто відбувається за обмежених ресурсів ремонтної бази та за наявності факторів, що ускладнюють підтримання технічної готовності: старіння парку, нерівномірність навантаження, дефіцит персоналу, подорожчання запасних частин і збільшення вартості простоїв.

Традиційна практика планово-попереджувального технічного обслуговування (ППТО) ґрунтується на регламентних інтервалах (за часом або пробігом), які задаються нормативами та історично

сформованими підходами. Перевагою таких регламентів є простота та керованість: депо може планувати завантаження постів і персоналу, а експлуатаційні служби — будувати оборот. Проте фіксований інтервал за своєю природою є компромісом і не враховує реальну варіативність деградації. Для одних одиниць рухомого складу регламент може виявитися надто консервативним (виконуються “зайві” втручання, зростають простой та витрати), для інших — надто ризикованим (накопичення дефектів призводить до відмов у русі, вторинних пошкоджень та зриву графіка).

Актуальність оптимізації ППТО посилюється стохастичною природою відмов і залежністю інтенсивності відмов від умов експлуатації. Навіть для однакових типів рухомого складу відмінності у профілі навантаження, температурних режимах, якості колії, стилі ведення та організації обороту можуть суттєво змінювати темп зносу. Тому для підвищення ефективності ТО необхідно поєднувати моделі надійності, що описують імовірність відмов у часі, економічні оцінки, які відображають різницю між плановим і аварійним втручанням, та (iii) обмеження ресурсів (ремонтні потужності, матеріально-технічне забезпечення, часові “вікна” для постановки у депо).

Перспективним напрямом є ризик-орієнтоване планування технічного обслуговування (Risk-Based Maintenance, RBM), у якому рішення про інтервал і пріоритет виконання ППТО приймається з урахуванням не лише ймовірності відмови, а й наслідків відмови. У залізничному транспорті наслідки можуть бути багатокомпонентними: безпекові (підвищення ризику небезпечних ситуацій), операційні (затримки, порушення розкладу, зменшення доступності парку), економічні (вартість відновлення, штрафи, втрата доходу через простій) та репутаційні. Таким чином, навіть за однакової ймовірності відмови різні вузли/підсистеми мають різну критичність, а отже потребують різної політики ТО.

Важливим чинником актуальності RBM є цифровізація та розвиток технологій моніторингу стану (Condition Based Maintenance, CBM) і прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance / Prognostics and Health Management, PdM/PHM). Сучасні системи діагностики, wayside-сенсори та бортові вимірювання створюють потік даних щодо стану колісних

пар, підшипників, гальмівних систем, тягового обладнання тощо [1, 2, 3]. Однак практична цінність даних виникає лише тоді, коли вони перетворюються у керовані рішення: коли саме виконувати ППТО, які роботи виконувати першочергово та як узгоджувати це з графіком експлуатації і потужностями депо. Саме тому актуальним є розвиток інтегрованих підходів, які поєднують моделі надійності/ризиків з оптимізацією планів ТО та ресурсів.

Отже, актуальність теми зумовлена необхідністю зменшення позапланових відмов і втрат від простоїв без непропорційного збільшення частоти планових втручань. Розроблення та обґрунтування ризик-орієнтованого підходу до ППТО створює основу для прозорого, відтворюваного планування інтервалів ТО, підвищення технічної готовності та раціонального використання ресурсів депо.

Метою роботи є сформулювати рекомендації щодо практичного застосування підходу на рівні депо (пріоритезація робіт, використання даних моніторингу, узгодження з ресурсними обмеженнями).

Об’єкт дослідження — процеси планування та виконання планово-попереджувального технічного обслуговування рухомого складу в умовах стохастичного виникнення відмов і обмежених ресурсів ремонтної бази.

Предмет дослідження — методи та моделі ризик-орієнтованого вибору між ремонтних інтервалів ППТО (та, за потреби, пріоритетів виконання) на основі параметричних моделей надійності й оцінювання наслідків відмов.

Мета дослідження — розробити та обґрунтувати підхід до оптимізації інтервалів ППТО рухомого складу з урахуванням ризику відмов, який мінімізує очікувані сумарні втрати (витрати на ТО/ремонт і простій) за забезпечення прийнятного рівня безпеки та експлуатаційної надійності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі задачі дослідження:

- виконати огляд сучасних підходів до ТО рухомого складу (ППТО, RCM, CBM, PdM/PHM, RBM)
- та визначити їх придатність для задачі оптимізації інтервалів;
- сформувати систему показників ефективності (KPI) для оцінювання якості політики ТО: частота відмов, доступність, простій, питомі витрати, операційні втрати від затримок;

- обрати модель надійності для опису часу до відмови ключового вузла/підсистеми (наприклад, Вейбулівський розподіл) та визначити підхід до оцінювання параметрів за даними;

- запропонувати ризик-орієнтовану постановку оптимізації інтервалу ППТО (функція “вартість + ризик” або мінімізація очікуваних втрат за обмеженням на ризик);

- визначити вимоги до вихідних даних і процедуру верифікації/валідації моделі на основі фактичних показників експлуатації;

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний науковий доробок у сфері технічного обслуговування залізничного транспорту умовно можна згрупувати за чотирма напрямками: моніторинг технічного стану та діагностика, прогнозування деградації й залишкового ресурсу (RUL) у межах PdM/PHM, оптимізація графіків ППТО та інтеграція з експлуатаційним плануванням, (4) ризик-орієнтовані фреймворки прийняття рішень.

Поширення wayside-ionboard-систем моніторингу стимулювало значну кількість оглядових робіт. Зокрема, Kundu та ін. систематизують технології моніторингу для рухомого складу (вібрації, акустика, термографія, аналіз мастила) і обговорюють їх придатність для різних компонентів [1]. Систематичний огляд і бібліометричний аналіз Kostrzewski & Melnik демонструє зростання уваги до condition monitoring в залізничних системах, а також виділяє ключові технологічні тренди та прогалини у стандартизації даних [2]. Приклад прикладного напрямку — робастні сенсори для вузлів із мастилом (локомотиви/вагони) як інфраструктура для CBM [3].

УРНМ-спільноті підкреслюють специфіку залізничного транспорту: високі вимоги до безпеки, довгі життєві цикли активів та необхідність інтеграції технічних рішень у операційні процеси. Це відображено у спеціальному випуску IJPHM, присвяченому PHM для залізничних систем і масового транспорту [4]. На рівні флоту важливим є поєднання прогнозу відмов із рішеннями щодо планування, що демонструють моделі динамічного управління ТО для рухомого складу у *Reliability Engineering & System Safety* [5]. У цій логіці прогноз технічного стану розглядається не як самоціль, а як вхід для рішень щодо постановки у депо з урахуванням експлуатаційних обмежень.

Оптимізація графіків ППТО та інтеграція з експлуатаційним плануванням

Математичні моделі планування ТО для рухомого складу активно розвиваються у бік інтегрованих постановок “експлуатація—ТО—ресурси”. У *Journal of Rail Transport Planning & Management* розглянуто включення технічних робіт у план обігу за умов невизначеної тривалості ТО, що є типовим для реальних депо [6].

Окремий клас задач — вибір локації виконання ТО разом із календарним планом, що формалізується як Maintenance Scheduling and Location Choice Problem (MSLCP); ефективні підходи включають логіко-орієнтовану декомпозицію [7]. Стохастичні постановки, де відмови моделюються через параметричні розподіли (в т.ч. Вейбулла), представлені у сучасних роботах зі сценарним програмуванням [8].

Практично значущими є підходи до спільної оптимізації розкладів і ППТО, зокрема на основі мережевих (spatiotemporal) моделей для метрополітену [9]. Узагальнений стан алгоритмів оптимізації ППТО для залізничних транспортних засобів (включно з евристичними / метаевристичними) проаналізовано у [10], де підкреслено високу обчислювальну складність практичних задач і потребу у компромісі між оптимальністю та швидкістю розрахунку.

На дійсно-орієнтоване обслуговування (Reliability -Centered Maintenance, RCM) часто використовують для ранжування компонентів за критичністю та вибору типів ТО. Сучасні публікації демонструють поєднання RCM із reliability block diagram та індексами критичності для визначення пріоритетів компонентів рухомого складу [11]. Для кількісного відбору інтервалів ППТО корисними є прикладні “data-driven” кейси на базі розподілу Вейбулла і функцій вартості, наприклад для гальмівної системи легкорейкового транспорту [12].

Ризик-орієнтовані рішення також розвиваються в суміжних областях, де поєднуються імовірнісні моделі з теорією корисності/втрат. Наприклад, Hughes та ін. пропонують ймовірнісну risk-based схему прийняття рішень у SHM, яка концептуально близька до задач RBM у ТО (оцінка стану $\rightarrow$ ризик $\rightarrow$ рішення) [13].

Для економічної оцінки ефекту CBM використовують комбінації дерев відмов і Монте-Карло; прикладом є модульний підхід із динамічними деревами відмов [14].

Методологічну рамку планування інспекцій на основі ризику систематизовано у стандарті ASME PCC-3 [15], який, хоча й не є галузевим залізничним стандартом, задає логіку рівнів ризик-аналізу (якісний— кількісний) та підходів до встановлення інтервалів.

За результатами аналізу джерел можна зробити такі висновки.

Найкраще розкриті аспекти: технології моніторингу стану та сенсорика для ключових вузлів рухомого складу [1, 2, 3]; моделі інтегрованого планування ТО та обігу із використанням ILP/MILP і декомпозицій [6,7,9]; флотні постановки PdM/PHM як інструмент зменшення позапланових відмов [4,5].

Недостатньо розкриті аспекти (актуальні напрями досліджень): (1) практично відтворювані методики перетворення індикаторів стану (CBM/PdM) у рішення про інтервали ППТО та пріоритети робіт у депо; (2) узгодження “ймовірність × наслідки” із КРІ перевізного процесу (пунктуальність, доступність, рівень сервісу) та з ресурсними обмеженнями ремонтної бази; (iii) калібрування моделей надійності (зокрема Вейбулла) за обмежених та “за шумлених” даних депо; (4) інтеграція оцінки економічних наслідків (вартість простою, штрафи, вторинні пошкодження) у єдину цільову функцію для вибору інтервалів ППТО.

Виклад основного матеріалу дослідження. Нижче наведено методи, які найчастіше застосовуються для вибору інтервалів ТО та формування графіків технічного обслуговування в умовах невизначеності. Для кожного методу подано коротку математичну ідею, сильні/слабкі сторони та ілюстрації.

Регламентне ППТО (time-/mileage-based). Метод передбачає виконання ТО через сталий інтервал T :

$$T = \text{const.} \quad (1)$$

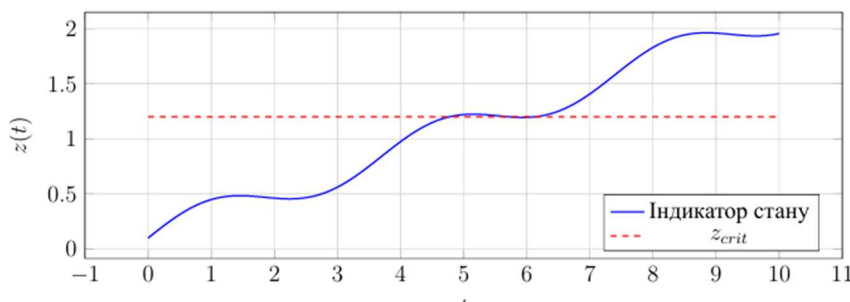


Рис. 1. Приклад порогового правила CBM: втручання ініціюється при перетині z_{crit} .

де T — регламентний інтервал ТО (за часом або пробігом), const — фіксоване значення, встановлене нормативами/регламентом. Переваги методу — простота, прогнозоване завантаження депо, мінімальні вимоги до даних. Слабкі сторони: ігнорування індивідуальної деградації, ризик “зайвого” ТО або пропуску критичної деградації.

Reliability-Centered Maintenance (RCM) і критичність. RCM формує політику ТО на основі функцій системи, режимів відмов та їх наслідків. Для агрегування надійності часто застосовують RBD-моделі. Для послідовної структури (2):

$$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t), \quad (2)$$

де $R_{sys}(t)$ — імовірність безвідмовної роботи системи до моменту t (для послідовної структури), $R_i(t)$ — надійність i -го елемента, n — кількість елементів, t — час/пробіг. Сильні сторони методу: орієнтація на безпеку та критичні функції; прозорі підстави для пріоритезації [11]. Слабкі сторони: висока трудомісткість аналізу FMECA/RCM; потреба у експертних оцінках і даних.

Condition-Based Maintenance (CBM) за порогами. CBM виконує втручання за досягнення порога індикатора стану $z(t)$:

$$\text{ТО, якщо } z(t) \geq z_{crit}. \quad (3)$$

де $z(t)$ — індикатор (метрика) технічного стану в момент t , z_{crit} — критичний поріг (граничне значення), при досягненні якого ініціюється ТО, t — час/пробіг. Сильні сторони — зменшення зайвих втручань; раннє виявлення деградації [2, 3]. Слабкі сторони: вартість сенсорика/даних; складність встановлення робочих порогів. На рис 1 наведено приклад порогового правила CBM.

Predictive Maintenance / PHM (PdM/PHM) і оцінка RUL. PdM/PHM планує втручання, використовуючи прогноз залишкового ресурсу (див. формулу (4)):

$$RULd = f(\mathbf{x}(t)), \quad (4)$$

де $f(\cdot)$ — модель/алгоритм прогнозування (RUL—оцінка залишкового ресурсу (Remaining Use ful регресія, ML-модель або фізична модель деградації), $\mathbf{x}(t)$ — вектор ознак у момент t (показники діагностики, сенсорні вимірювання та умови експлуатації), t — поточний час/пробіг. У флотних задачах PdM є найбільш ефективним, коли інтегрований із плануванням експлуатації та обмеженнями депо [4, 5]. Сильні сторони: зменшення позапланових відмов, адаптивність. Слабкі сторони: висока складність, ризик зміщень через дрейф даних і зміну умов.

Математична оптимізація графіків ТО (ILP/MILP, мережеві моделі). Інтегровані задачі “обіг—ТО—ресурси” часто формалізують у вигляді ILP/MILP (див. формулу (5)):

$$\min c^T x \text{ s.t. } Ax \leq b, x \in \{0, 1\}^m. \quad (5)$$

де x — вектор бінарних змінних рішень (наприклад, призначення робіт/вікон ТО), c — вектор питомих витрат/штрафів, A — матриця обмежень, b — вектор правих частин, m — кількість змінних; нерівність $Ax \leq b$ описує ресурсні, часові та технологічні обмеження. Переваги методу можливість врахувати численні обмеження (вікна, ресурси, локації) і отримати оптимальне/квазіоптимальне рішення [6, 7, 9]. Слабкі сторони: обчислювальна складність; потреба у спрощеннях і точних даних.

Імітаційне моделювання (DES) для оцінки політик ТО. DES застосовують для відтворення потоків постановки у депо, черг ресурсів і впливу невизначеності тривалостей. Показник, наприклад, середній час циклу може оцінюватися як (див. формулу (6)):

$$\bar{T}_{cycle} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t_k^{out} - t_k^{in}). \quad (6)$$

де T_{cycle} — середня тривалість циклу обслуговування/перебування у системі, N — кількість змодельованих циклів (заявок/постановок), t_k^{in} — час входу k -го об'єкта в систему (прибуття/постановка), t_k^{out} — час виходу (завершення ТО/випуск). Сильні сторони: реалістичність, можливість моделювати складні правила й стохастичку. Слабкі сторони: потреба у калібруванні й валідації; відсутність “закритої” оптимальності [16].

Risk-Based Maintenance (RBM) із параметричною моделлю надійності

У RBM ризик можна подати як (див. формулу (7)):

$$Risk(t) = P(X \leq t) \cdot C_{cons}, \quad (7)$$

де $Risk(t)$ — очікуваний ризик/очікувані втрати до віку t , $P(X \leq t) = F(t)$ — імовірність відмови до моменту t , X — випадкова величина “час до відмови”, C_{cons} — узагальнена вартість (наслідки) відмови.

Для розподілу Вейбулла (див. формулу (8)):

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right), \quad h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (8)$$

де $F(t)$ — функція розподілу (ймовірність відмови до (t) , $h(t)$ — інтенсивність відмов (hazard rate), β — параметр форми, η — параметр масштабу (характерний час/пробіг), t — вік/пробіг компонента. Сильні сторони: пряме узгодження інтервалів із прийнятим ризиком і наслідками; природна пріоритетизація. Слабкі сторони: складність оцінювання C_{cons} та калібрування параметрів за обмежених даних [15, 13].

Графічне порівняння $h(t)$ наведено на рис. 2.

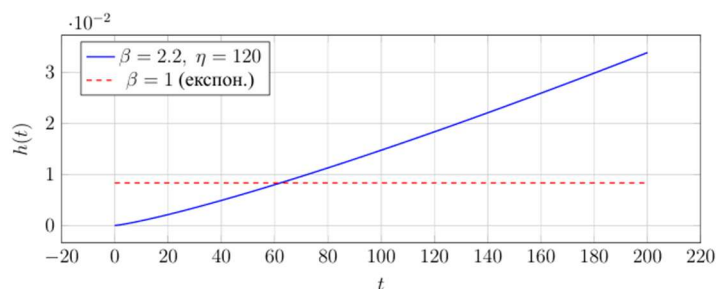


Рис. 2. Порівняння інтенсивності відмов $h(t)$: зростаючий Вейбулл ($\beta > 1$) та сталий експоненційний випадок

Для задачі вибору міжремонтних інтервалів ППТО з урахуванням ризику відмов у межах цієї роботи обрано RBM у поєднанні з параметричною моделлю Вейбулла та спрощеною економічною функцією втрат. Вибір обґрунтовано тим, що: метод напряду пов'язує інтервал ТО з ймовірністю відмови та наслідками; потребує порівняно невеликого набору параметрів для демонстраційного експерименту; може бути природно розширений до CBM/PdM (через оновлення параметрів ризику за даними) та інтегрований з MILP/DES для врахування ресурсних обмежень у подальших дослідженнях.

Планування й проведення експерименту.

Мета експерименту — визначити раціональний інтервал ППТО T^* за критерієм мінімізації очікуваних питомих втрат за політикою “вікової” заміни (agereplacement).

Приймаємо, що час до відмови X має розподіл Вейбулла з параметрами β і η . Якщо відмова трапляється до віку T , виконується коригувальне втручання з вартістю C_{CM} ; якщо відмови не сталося до T , виконується планове ТО з вартістю C_{PM} .

Для демонстрації приймаємо параметри: $\beta = 2.2$, $\eta = 120$ (умовні одиниці часу/пробігу), $C_{PM} = 1$, $C_{CM} = 8$.

5.2. Математична модель (демонстраційна). Ймовірність відмови до моменту T визначається формулою (9):

$$F(T) = P(X \leq T) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right) \quad (9)$$

де $F(T)$ — функція розподілу часу до відмови (ймовірність відмови до віку T), $P(\cdot)$ — ймовірність події, X — випадкова величина “час до відмови”, T — інтервал ППТО (вік/пробіг, на якому виконують планове втручання), $\exp(\cdot)$ — експонента, β — параметр форми Вейбулла, η — параметр масштабу Вейбулла.

Ймовірність безвідмовної роботи (див. формулу(10)):

$$R(T) = 1 - F(T) = \exp\left(-\left(\frac{T}{\eta}\right)^\beta\right). \quad (10)$$

де $R(T)$ — функція надійності (ймовірність, що відмова не станеться до T), а співвідношення $R(T) = 1 - F(T)$ є загальною тотожністю для неперервного розподілу.

Очікувана вартість одного циклу (планове ТО або коригувальний ремонт) задається формулою (11):

$$E[C(T)] = C_{CM}F(T) + C_{PM}R(T). \quad (11)$$

де $E[C(T)]$ — математичне сподівання (очікувана вартість) одного циклу за інтервалу T , $C(T)$ — випадкова вартість циклу, C_{CM} — вартість коригувального ремонту (якщо відмова сталася до T), C_{PM} — вартість планового ТО (якщо відмови до T не було); множники $F(T)$ та $R(T)$ виступають відповідними ймовірностями сценаріїв.

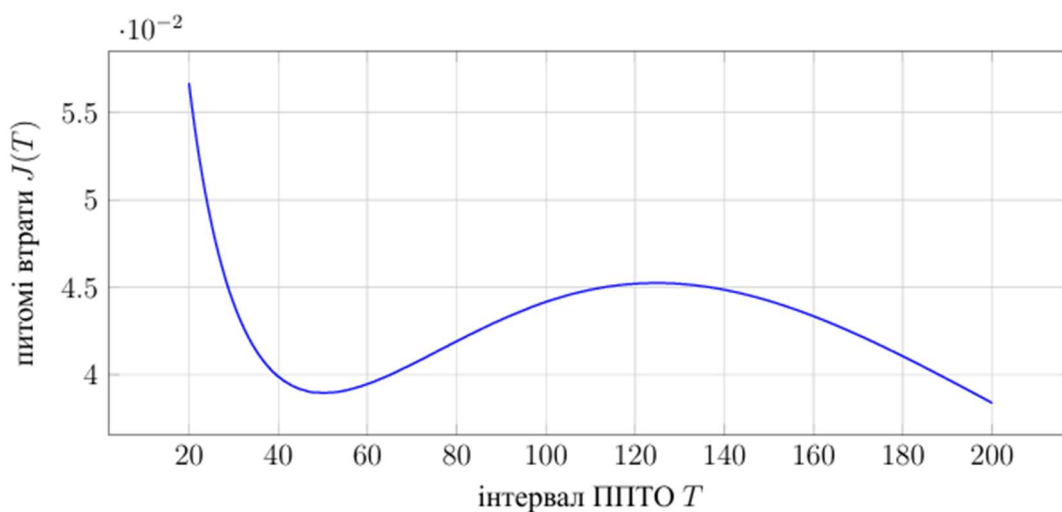


Рис. 3. Демонстраційна залежність $J(T)$ від інтервалу ППТО: компроміс між плановими втручанням та втратами від відмов

Для спрощеної оцінки питомих втрат використаємо формулу (12):

$$J(T) = \frac{E[C(T)]}{T} \quad (12)$$

де $J(T)$ — питомі (на одиницю часу/пробігу) очікувані втрати за політикою “вікової” заміни з інтервалом T ; чисельник $E[C(T)]$ — очікувані витрати за цикл, знаменник T — довжина інтервалу між плановими втручаннями.

Примітка: у більш строгій постановці у знаменнику використовується $E[\min(X, T)]$; тут застосовано спрощення для наочного експерименту.

Результати експерименту.

Побудуємо графік $J(T)$ та визначимо область мінімуму (див. рис. 3).

Для контрольної перевірки порівняємо кілька значень.

Експеримент показує, що навіть у спрощеній постановці існує область раціональних інтервалів ППТО: зменшення T знижує ймовірність відмов, але збільшує частоту планових робіт; збільшення T зменшує частоту ППТО, але різко підвищує очікувані втрати від коригувальних ремонтів. Отримана методика може бути розширена шляхом (i) введення явного обмеження на ризик, (ii) використання $E[\min(X, T)]$ у знаменнику, (iii) інтеграції ресурсних обмежень депо через MILP або DES.

Висновки. Розкрито актуальність оптимізації ППТО рухомого складу та обґрунтовано доцільність переходу до ризик-орієнтованого планування, яке враховує ймовірність відмови та наслідки для безпеки й експлуатації.

На основі аналізу сучасних публікацій систематизовано підходи RCM, CBM, PdM/PHM, оптимізаційні моделі графіків ТО та ризик-орієнтовані фреймворки; визначено прогалини, пов'язані з інтеграцією “ймовірність×наслідки” з KPI та ресурсними обмеженнями депо.

Виконано огляд методів сучасної науки й практики та обґрунтовано вибір RBM+Вейбулл як базового підходу для задачі вибору інтервалів ППТО.

Проведено демонстраційний експеримент і показано наявність компромісу між частотою планових робіт і втратами від відмов, що дозволяє визначати область раціональних інтервалів ППТО.

Результати демонструють елементи наукової новизни:

1. постановку задачі оптимізації інтервалів ППТО у термінах “очікувані втрати + ризик” з використанням параметричної моделі надійності (Вейбулл) для кількісного зв'язку між інтервалом ТО та ймовірністю відмови;

2. демонстрацію відтворюваної процедури експериментальної оцінки раціонального інтервалу ППТО та аналізу чутливості до співвідношення вартостей планового й коригувального втручання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

1. калібрування параметрів Вейбулла за фактичними даними депо та врахування цензурованих спостережень;

2. інтеграцію RBM із CBM/PdM (оновлення ризику за даними діагностики) та з ресурсними обмеженнями депо (MILP/DES);

3. формалізацію наслідків відмов через KPI перевізного процесу (затримки, доступність, SLA) і розроблення правил пріоритезації ремонтних робіт.

Література

1. Kundu P., Darpe A. K., Singh S. P., Gupta K. A review on condition monitoring technologies for railway rolling stock. *PHM Society European Conference*. 2018. Vol. 4, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.36001/phme.2018.v4i1.483>
2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition monitoring of rail transport systems: a bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. P. 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144710>
3. Robust sensors enabling condition-based maintenance of lubricated components in locomotives and wagons. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3236–3243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.891>
4. Andrews J. et al. PHM for railway systems and mass transportation (special issue editorial). *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2020. Vol. 11, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i2.2933>
5. International Journal of Prognostics and Health Management. [Journal Profile/Editorial Information]. 2020.
6. Dynamic fleet maintenance management model applied to rolling stock. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 240. Art. 109607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109607>
7. Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations. *Journal of Rail Transport*

- Planning & Management*. 2020. Vol. 12. Art. 100177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100177>
8. Zomer J., Besinovic N., de Weerd M. M., Goverde R. M. P. The maintenance scheduling and location choice problem for railway rolling stock. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.00454>
 9. Elhfcseyi M., Kocuk B. A stochastic programming approach to the railcar maintenance problem with service level and track capacity considerations. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.08427>
 10. Joint optimization method for preventive maintenance and train scheduling of subway vehicles based on a spatiotemporal network graph. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 8. P. 4138. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084138>
 11. Models and algorithms for the preventive maintenance optimization of railway vehicles. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 240. Art. 122589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122589>
 12. Identifying critical components for railways rolling stock reliability: a case study for Iran. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 2854. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52037-1>
 13. Corman F., Kraijema S., Godjevac M., Lodewijks G. Optimizing preventive maintenance policy: a data-driven application for a light rail braking system. *Proc IMechE, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2017. Vol. 231, No. 5. P. 534–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/1748006X17719409>
 14. Hughes A. J. et al. A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.01521>
 15. Southgate J. M., Groth K., Sandborn P., Azarm S. Cost-benefit analysis using modular dynamic fault tree analysis and Monte Carlo simulations for condition-based maintenance. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.09519>
 16. ASME PCC-3: Inspection Planning Using Risk-Based Methods. New York : ASME, 2022.
 17. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education, 2015.
 - locomotives and wagons. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 3236–3243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.891>
 4. Andrews J. et al. PHM for railway systems and mass transportation (special issue editorial). *International Journal of Prognostics and Health Management*. 2020. Vol. 11, No. 2. DOI: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2020.v11i2.2933>
 5. International Journal of Prognostics and Health Management. [Journal Profile/Editorial Information]. 2020.
 6. Dynamic fleet maintenance management model applied to rolling stock. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 240. Art. 109607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109607>
 7. Maintenance scheduling within rolling stock planning in railway operations under uncertain maintenance durations. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 2020. Vol. 12. Art. 100177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2020.100177>
 8. Zomer J., Besinovic N., de Weerd M. M., Goverde R. M. P. The maintenance scheduling and location choice problem for railway rolling stock. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2103.00454>
 9. Elhfcseyi M., Kocuk B. A stochastic programming approach to the railcar maintenance problem with service level and track capacity considerations. *arXiv preprint*. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2509.08427>
 10. Joint optimization method for preventive maintenance and train scheduling of subway vehicles based on a spatiotemporal network graph. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 8. P. 4138. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15084138>
 11. Models and algorithms for the preventive maintenance optimization of railway vehicles. *Expert Systems with Applications*. 2024. Vol. 240. Art. 122589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122589>
 12. Identifying critical components for railways rolling stock reliability: a case study for Iran. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 2854. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52037-1>
 13. Corman F., Kraijema S., Godjevac M., Lodewijks G. Optimizing preventive maintenance policy: a data-driven application for a light rail braking system. *Proc IMechE, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2017. Vol. 231, No. 5. P. 534–545. DOI: <https://doi.org/10.1177/1748006X17719409>
 14. Hughes A. J. et al. A probabilistic risk-based decision framework for structural health monitoring. *arXiv preprint*. 2021. URL: <https://arxiv.org/abs/2101.01521>
 15. Southgate J. M., Groth K., Sandborn P., Azarm S. Cost-benefit analysis using modular dynamic fault tree analysis and Monte Carlo simulations for condition-based maintenance. *arXiv preprint*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2405.09519>

References

1. Kundu P., Darpe A. K., Singh S. P., Gupta K. A review on condition monitoring technologies for railway rolling stock. *PHM Society European Conference*. 2018. Vol. 4, No. 1. DOI: <https://doi.org/10.36001/phme.2018.v4i1.483>
2. Kostrzewski M., Melnik R. Condition monitoring of rail transport systems: a bibliometric performance analysis and systematic literature review. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. P. 4710. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21144710>
3. Robust sensors enabling condition-based maintenance of lubricated components in

16. ASME PCC-3: Inspection Planning Using Risk-Based Methods. New York : ASME, 2022.
17. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

Dolia K.V. Optimization of planned and preventive maintenance of rolling stock taking into account the risk of failures.

The paper considers the problem of increasing the efficiency of planned preventive maintenance (PPTO) of rolling stock by moving from rigidly fixed scheduled intervals to risk-based planning (Risk-Based Maintenance, RBM). The relevance of the topic is due to the simultaneous increase in requirements for safety and punctuality of transportation, aging of the fleet and increasing the cost of downtime, while the throughput capacity of the depot (posts, personnel, spare parts) remains limited. In such conditions, the same maintenance intervals for all units of equipment are a compromise: for some of the rolling stock they are overly conservative and cause unnecessary costs, for others they create an increased probability of failures in motion. The key idea of RBM is to coordinate the periodicity and priorities of PPTO with the probability of failure and the consequences of failure. The consequences in railway systems are multi-component and include safety effects, operational losses (delays, schedule disruption, reduced fleet availability) and economic costs (repairs, downtime, fines). The purpose of the study is to propose and justify an approach to choosing maintenance intervals that minimizes the expected total losses while ensuring an acceptable level of risk. The methodological basis of the

work combines a review of modern concepts of maintenance, RCM, CBM and PdM/PHM with the formalization of the “cost + risk” problem based on parametric reliability models. For a quantitative description of degradation, a time-to-failure model with a Weibull distribution was used, which allows us to relate the maintenance interval T to the failure probability $F(T)$ and the expected costs for planned and corrective intervention. A demonstration example was used to calculate a rational maintenance interval and conduct a sensitivity analysis to the ratio of the costs of planned and emergency work. The existence of a region of optimal (rational) intervals is shown, in which a compromise is achieved between the frequency of planned work and losses from failures. The results obtained can be used as a basis for further integration with condition monitoring data (CBM/PdM) and for expanding the statement by introducing explicit risk constraints and depot resource constraints.

Keywords: rolling stock, maintenance, planned preventive maintenance, failure risk, reliability, Weibull distribution, RCM, CBM, PdM..

Доля Костянтин Вікторович – д.т.н., проф., кафедра автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна. ORCID 0000-0002-4693-9158 k.v.dolia@gmail.com

Стаття подана 19.11.2025.

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-298-12-88-95>

УДК 629.4.027.31-272.82

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНОЇ РЕСОРИ ШВИДКІСНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦІ

Кузишин А.Я.

STUDY OF THE TEMPERATURE OPERATING REGIME OF A PNEUMATIC SUSPENSION SPRING OF HIGH-SPEED RAILWAY ROLLING STOCK

Kuzyshyn A. Ya.

Зростання швидкостей руху рухомого складу залізниць зумовлює підвищення вимог до надійності елементів пневматичного підвішування, зокрема гумокордних оболонок пневматичних ресор, термічний стан яких суттєво впливає на їх довговічність та експлуатаційні характеристики. У роботі наведено результати комплексного дослідження температурного режиму роботи пневматичної ресори швидкісного рухомого складу за умов дії змінних експлуатаційних навантажень. Розглянуто особливості зміни температури повітря в пневматичній ресорі під час термодинамічних процесів стиснення та розширення, що виникають унаслідок вертикальних коливань кузова та візків швидкісного рухомого складу. Проаналізовано вплив експлуатаційних факторів на перебіг теплових процесів у пневматичній ресорі, а також встановлено закономірності зміни температурних коливань повітря залежно від швидкості руху, амплітуди вертикальної нерівності рейкової колії та завантаженості кузова. Дослідження виконано на основі термодинамічної моделі роботи пневматичної ресори. Проведено порівняльний аналіз температурного режиму в режимах тари та брутто, визначено максимальні значення зміни температури повітря та оцінено їх відносну різницю. Встановлено, що різниця у максимальній зміні температури повітря між зазначеними режимами не перевищує 5,5 %, що свідчить про незначний вплив маси кузова на температурний режим роботи пневматичної ресори. Отримані результати можуть бути використані для уточнення умов теплової роботи гумокордної оболонки пневматичної ресори, а також під час подальших досліджень динамічних показників системи пневматичного ресорного підвішування швидкісного рухомого складу залізниць. Практичне впровадження отриманих результатів забезпечує підвищення надійності та довговічності пневматичних ресор шляхом стабілізації їх температурного режиму й

зниження термічного навантаження на гумокордну оболонку. Застосування отриманих даних дозволяє здійснювати обґрунтовану оцінку технічного стану пневматичних ресор, оптимізувати періодичність і обсяги технічного обслуговування, а також мінімізувати ймовірність відмов окремих елементів під час високошвидкісного руху. Це є важливим чинником забезпечення надійної, безперебійної та безпечної експлуатації залізничного транспорту.

Ключові слова: швидкісний рухомий склад, пневматична ресора, тепловий процес, температура, швидкість руху нерівність рейкової колії.

Вступ. Розвиток швидкісного залізничного руху в Україні розпочато ще у 2002 році [1]. Як наслідок це призвело до введення в експлуатацію швидкісних електропоїздів HRCS2 компанії Hyundai Rotem та EJ 675 компанії Škoda Vagonka (рис. 1–2).



Рис. 1. Швидкісний електропоїзд HRCS2



Рис. 2. Електропоїзд EJ 675

Також, у 2011–2012 роках Крюківським вагонобудівним заводом введено в експлуатацію швидкісний електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан» (рис. 3).



Рис. 3. Швидкісний електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан»

Експлуатація рухомого складу зі швидкостями понад 140 км/год призвела до зростання вимог щодо його динамічних характеристик, безпеки руху та рівня комфортабельності перевезення пасажирів.

Одним із ключових елементів ходової частини швидкісного рухомого складу є пневматична система ресорного підвішування, у межах якої застосовується пневматична ресора (рис. 4). Експлуатація рухомого складу призводить до складних механічних і теплових навантажень на пневматичну ресору, які виникають при її деформуванні у процесі взаємодії колісних пар з рейковою колією [2–3]. Через це відбувається зміна температурного режиму роботи пневматичної ресори, що впливає на фізико-механічні властивості її матеріалу, параметри стисненого повітря та динамічну жорсткість, а отже може позначатися на динаміці руху й довговічності елементів ходової частини [4].

Відомими моделями, які описують роботу пневматичної ресори є: механічні [5–8], термодинамічні [9–10] та скінченно-елементні [11–14].

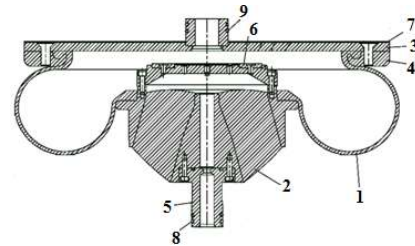


Рис. 4. Пневматична ресора електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан»: 1 – гумокордна оболонка; 2 – конічний гумометалевий амортизатор; 3 – верхня пластина; 4 – кільце; 5 – штифт; 6 – пластина; 7 – гумова пластина; 8, 9 – ущільнююче кільце

До типових еквівалентних механічних моделей відносяться «модель Nishimura» [5], «модель Simpack» [6], «модель Vampire» [7] та «модель Berg» [8].

У моделі Nishimura (рис. 5) об'єми пневматичної ресори V_b та додаткового резервуара V_r розглядаються окремо, із можливістю врахування лінійного в'язкого демпфування.

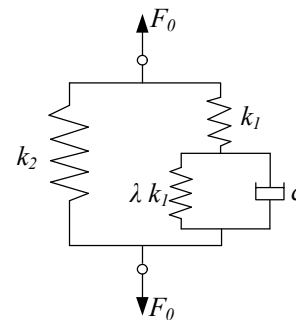


Рис. 5. Модель Nishimura

Складові вертикальної жорсткості визначаються за формулами:

$$k_1 = n \cdot A_e^2 \cdot \frac{p_0}{V_b}, \quad (1)$$

$$k_2 = (p_0 - p_{at}) \cdot \frac{dA_e}{dx}, \quad (2)$$

де: p_0 – внутрішній тиск в стані рівноваги, Н/м²;

p_{at} – атмосферний тиск, Н/м²;

A_e – ефективна площа пневматичної ресори, м²;

n – показник політропи.

Модель Simpac є продовженням моделі Nishimura та додатково враховує вплив аварійної пружини.

Подальший розвиток моделей Nishimura та Simpras відбувався шляхом включення інерційної складової, яка описує рух повітряної маси в з'єднувальному трубопроводі з урахуванням її прискорення (рис. 6). Реалізацію цього підходу здійснено в програмному комплексі Vampire.

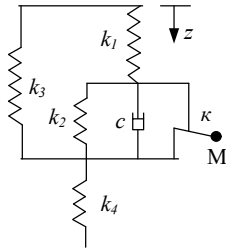


Рис. 6. Модель Vampire

Модель Berg є нелінійною механічною моделлю пневматичної ресори, що враховує поперечну, поздовжню й вертикальну динаміку. Модель включає тринадцять ідентифікаційних параметрів та враховує три основні ефекти: пружні, фрикційні й в'язкі властивості.

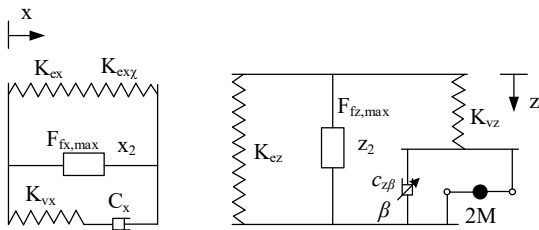


Рис. 7. Модель Berg

Вертикальна модель має дві пружини K_{ez} і K_{vz} , демпфер тертя $F_{fz,max}$, z_2 , нелінійний в'язкий демпфер $C_{z\beta}$, β і масу $2M$, яка описує інерцію повітря в трубопроводі. Пружна частина описується параметром K_{ez} , фрикційна частина – $F_{fz,max}$, z_2 і в'язка частина – K_{vz} , $C_{z\beta}$, β , $2M$.

Аналіз механічних моделей дозволив з'ясувати, що робота пневматичної ресори в середньо-частотному діапазоні (від 6 до 14 Гц) є нелінійною, а її параметри залежать від амплітуди коливань. Одним із недоліків механічних моделей є невизначеність великої кількості вхідних параметрів, які пропонується знаходити на основі попередніх експериментів. Крім цього, вибір показника політропи у моделях ускладнений, оскільки його точне значення невідоме і обирається в межах фізично обґрунтованого діапазону, що залежить від швидкості процесу та теплового обміну.

Аналіз термодинамічних моделей [9–10] показав, що їх можна класифікувати за кількістю врахованих елементів (пневматична ресора, трубопровід, отвір, додатковий резервуар, регулювальні клапани) та фізичних явищ (тертя, інерція повітря, теплопередача тощо).

На рис. 8 наведена термодинамічна модель [9] пневматичної системи ресорного підвищення, яка містить пневмобалон, трубопровід і резервуар.

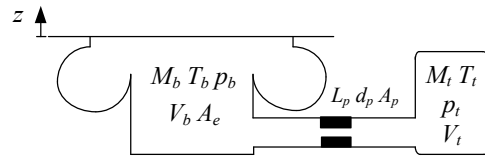


Рис. 8. Термодинамічна модель пневматичної системи [9]

При термодинамічних процесах важливим є те, що тиск газу всередині пневматичної ресори залежить від швидкості та величини деформації ресори. Вказана особливість показує, що тиск і, відповідно, жорсткість пневматичної ресори будуть мати різні значення при ізотермічному, адіабатичному, політропному процесах.

Основними рівняннями математичної моделі є отримання квазістатичної та динамічної жорсткості:

$$K_z^{\text{дин}} = \gamma \cdot (p_{at} + p_0) \cdot \frac{A_e^2}{V} + p_0 \cdot \frac{dA_e}{dz}, \quad (3)$$

$$K_z^{\text{ст}} = (p_{at} + p_0) \cdot \frac{A_e^2}{V} + p_0 \cdot \frac{dA_e}{dz}, \quad (4)$$

де γ – показник адіабати.

За умови, що повітря в системі розглядається як ідеальний газ, його стан у пневматичній ресорі описується рівняннями [10].

$$P_s dV_s + V_s dP_s = R(m_s dT_s + T_s dm_s), \quad (5)$$

$$dQ = dE + P_s dV_s + h dm_s, \quad (6)$$

$$dE = C_v m_s dT_s + C_v T_s dm_s, \quad (7)$$

де P_s – абсолютний тиск у пневморесорі, Па;

V_s – об'єм пневматичної ресори, м³;

R – газова стала, Дж/(кг·К);

m_s – повітряна маса в пневматичній ресорі,

кг;

T_s – температура повітря в ресорі, К;
 dQ – теплообмін між пневматичною ресорою та навколишнім середовищем;
 dE – зміна внутрішньої енергії;
 h – ентальпія повітря, Дж/кг;
 C_v – питома теплоємність за постійного об'єму.

У випадку адіабатичного режиму роботи ресори її динамічну жорсткість рекомендується обчислювати за такою залежністю:

$$K_d = (P_s - P_0) \frac{\partial A_e}{\partial z} + \frac{\gamma P_s A_e}{m_s} \frac{G}{z} - \frac{\gamma P_s A_e}{V_s} \frac{\partial V_s}{\partial z}. \quad (8)$$

де z – вертикальна деформація ресори, м;
 A_e – ефективна площа пневматичної ресори, м²;

Із аналізу літератури [11–14] встановлено, що найбільш точну динамічну поведінку пневматичної ресори можна отримати із використанням методу скінченних елементів (рис. 9). Однак складністю даного методу є значні затрати сил та часу на створення скінченно-елементної моделі та виконання розрахунків.

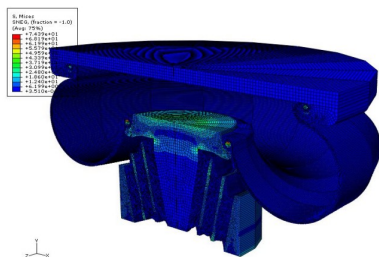


Рис. 9. Моделювання пневматичної ресори в програмному пакеті Abaqus методом скінченних елементів [14]

Із аналізу науково-дослідних робіт [5–14] встановлено, що температура повітря у пневматичній ресорі враховується опосередковано, через використання узагальнених показників адіабати або політропи. Це обмежує точність прогнозування поведінки ресори, оскільки результати значною мірою залежать від швидкості деформації та умов теплопередачі. Водночас у жодному з опрацьованих джерел не представлено досліджень, присвячених визначенню закономірностей зміни температури всередині пневматичної ресори, що є актуальним напрямом для подальших досліджень.

Метою роботи є дослідження характеру зміни температури повітря в пневматичній ресорі під час стиснення та розширення, а також

особливостей термодинамічного процесу, що відбувається в системі ресорного підвішування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні задачі:

1. Вивести рівняння зміни температури повітря в пневматичній ресорі за умов комплексної роботи пневматичної системи ресорного підвішування.

2. Отримати закономірності зміни температури повітря в пневматичній ресорі від швидкості руху, амплітуди вертикальної нерівності колії та режиму завантаженості кузова.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження температурного режиму роботи пневматичної ресори використано термодинамічну модель [15].

Повітря, що знаходиться в пневматичній системі ресорного підвішування, моделювалось як ідеальний газ, приймаючи відсутність молекулярних взаємодій. Застосовуючи рівняння стану ідеального газу отримано рівняння для визначення внутрішнього тиску повітря в пневматичній ресорі:

$$\dot{p}_1(t) = -\dot{h}_1(t) \frac{p_1(t)}{h_1(t)} + \dot{m}_1(t) \frac{R \cdot T_1(t)}{h_1(t) \cdot A_1} + \dot{T}_1(t) \frac{m_1(t) \cdot R}{h_1(t) \cdot A_1}, \quad (9)$$

де $h_1(t)$ – висота пневморесори у певний момент часу, м;

p_1, V_1, T_1 – відповідно тиск, об'єм та температура робочого тіла пневматичної ресори, (Па; м³; К);

m_1 – маса повітря, кг;

R – універсальна газова стала, Дж/(кг·К).

Для врахування передачі енергії з пневматичної ресори в додатковий резервуар і навпаки, а також теплопередачі між пневморесорою та навколишнім середовищем, використано закон збереження енергії:

$$\Delta U(t) = \Delta Q_p(t) - \Delta W(t) + \Delta E_{nep}(t), \quad (10)$$

$$m_1(t) \cdot c_v \cdot \Delta T_1(t) = h_t \cdot A_s(t) \cdot (T_s - T_1(t)) \Delta t - A_1 \cdot p_1(t) \cdot \Delta z_j(t) + \Delta m_1(t) \cdot c_p \cdot T_1(t), \quad (11)$$

$$m_2(t) \cdot c_v \cdot \Delta T_2(t) = \Delta m_2(t) \cdot c_p \cdot T_2(t), \quad (12)$$

де U – внутрішня енергія пневморесори, Дж;

Q_p – теплопередача, Дж;

W – виконана робота, Дж;

$E_{пер}$	передача енергії між пневморесорою та додатковим резервуаром, Дж;
A_s	— площа теплопередачі, м ² ;
h_T	— коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м ² ·К);
$\Delta z_f(t)$	— величина деформування пневматичної ресори, м;
c_v	— питома теплоємність при постійному об'ємі, Дж/(кг·К);
c_p	— питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К).

Провівши математичні перетворення та маючи рівняння визначення тиску в ресорі, масової витрати повітря через з'єднувальний трубопровід, отримано рівняння температури повітря в пневматичній ресорі:

$$\dot{T}_1(t) = -\frac{A_1 \cdot p_1(t) \cdot \Delta \dot{z}_f(t)}{m_1(t) \cdot c_v} - \frac{\dot{m}(t) \cdot c_p \cdot T_1(t)}{m_1(t) \cdot c_v} + \dots + \frac{h_T \cdot A_s(t) \cdot (T_s - T_1(t))}{m_1(t) \cdot c_v} \quad (13)$$

Отже, розглянемо характер зміни температури повітря в ресорі під час стиснення та розширення, а також особливості термодинамічного процесу, що відбувається в системі ресорного підвішування.

Дослідження проведемо для режиму тари при початковому тиску $p_0 = 5$ атм. та режиму брутто при $p_0 = 7$ атм. за умов дії випадкової вертикальної нерівності з довжиною хвилі 5÷25 м і амплітудою 5÷15 мм при швидкості руху 120÷250 км/год.

Графіки зміни температури робочого тіла у ресорі №1 та №2 при початковому тиску $p_0 = 7$ атм. (режим завантаження), амплітуді вертикальної нерівності колії 5 та 15 мм, швидкості руху 120 та 250 км/год наведено на рис. 10–11.

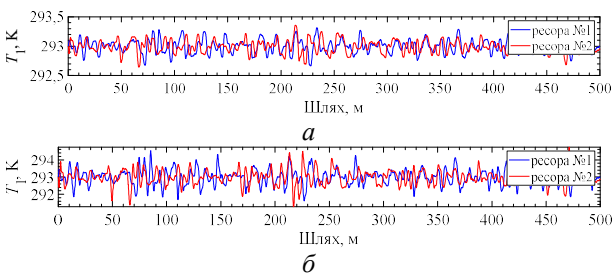


Рис. 10. Графіки зміни температури робочого тіла пневматичної ресори при швидкості руху 120 км/год та амплітуді вертикальної нерівності: а – 5 мм; б – 15 мм

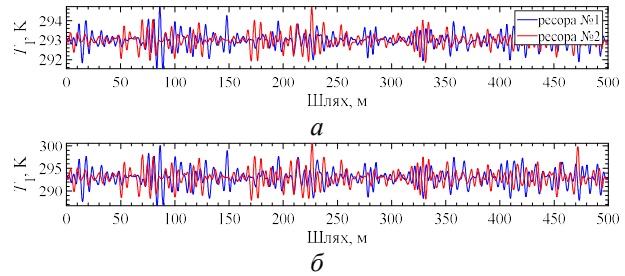


Рис. 11. Графіки зміни температури робочого тіла пневматичної ресори при швидкості руху 250 км/год та амплітуді вертикальної нерівності: а – 5 мм; б – 15 мм

Аналіз графіків на рис. 10 показує, що для ресор №1 та №2 максимальне значення температури робочого тіла при $v = 120$ км/год та амплітуді вертикальної нерівності 5 мм складає 293,36 К, а при амплітуді 15 мм – 294,75 К. При збільшенні швидкості руху до 250 км/год (рис. 11) максимальне значення температури робочого тіла пневматичних ресор при амплітуді вертикальної нерівності 5 мм складає 294,73 К, а при 15 мм – 300,57 К.

Отримані графіки показують абсолютну зміну температури робочого тіла в пневматичних ресорах. Для більш наочного порівняння термодинамічних процесів у режимах тари та брутто доцільно перейти до аналізу величини зміни температури відносно її початкового значення (рис. 12). Це дозволить оцінити інтенсивність температурних коливань у кожному режимі роботи незалежно від рівня початкового тиску та визначити вплив навантаженого стану на температурний режим роботи пневматичної системи.

Аналіз залежностей (рис. 12) показує, що характер зміни температури відносно початкового значення є нелінійним. При збільшенні швидкості руху та амплітуді вертикальної нерівності колії величина температурних коливань у пневматичній ресорі збільшується. Максимальна зміна температури повітря спостерігається за швидкості руху 250 км/год та амплітуді 15 мм і становить: для режиму тари – 7,9 К, для режиму брутто – 7,5 К.

Встановлено, що різниця у максимальній зміні температури повітря в пневматичних ресорах між режимом тари та режимом брутто за досліджуваних умов не перевищує 5,5%.

Таким чином, отримані результати характеризують температурний режим роботи пневматичних ресор за досліджуваних умов і можуть бути використані для подальшого аналізу роботи пневматичної системи ресорного

підвищення швидкісного залізничного рухомого складу.

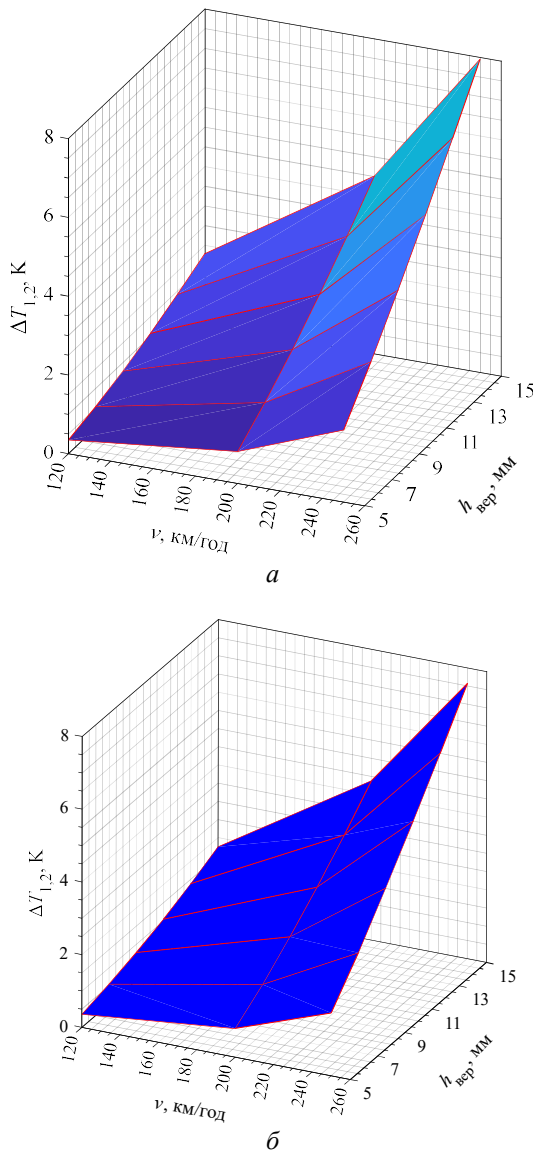


Рис. 12. Закономірності зміни температури повітря в пневматичній ресорі відносно початкового значення залежно від швидкості руху та амплітуди вертикальної нерівності колії:
а – режим тари; б – режим бруто

Висновки. Отримано рівняння зміни температури робочого тіла в пневматичній ресорі, що дозволяє враховувати комплекс факторів: теплопередачу між пневматичною ресорою та навколишнім середовищем, масову витрату повітря, а також енергетичні втрати при перетіканні повітря між ресорою та додатковим резервуаром.

Встановлено, характер зміни температури повітря в пневматичній ресорі відносно початкового значення при зміні швидкості руху

від 120 до 250 км/год та амплітуди нерівності від 5 до 15 мм є нелінійним.

Встановлено, що різниця у максимальній зміні температури повітря в пневматичних ресорах між режимом тари та режимом бруто за досліджуваних умов не перевищує 5,5%.

Література

1. Божок Н. О. Напрямки впровадження швидкісних пасажирських перевезень в Україні // Проблеми економіки транспорту: зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. 2013. № 5. С. 46–56.
2. Kuzyshyn A., Sobolevska J., Kostritsa S., Batig A., Boiarko V. Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock // AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2684, no. 1. Art. 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0120402>
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Royko Y., Kravets I., Sobolevska Y., Boikiv M. Methodology for evaluating the dynamic parameters of the rubber-cord shell of a high-speed rolling stock pneumatic spring in the wheel–frog interaction of a railroad switch // Archives of Transport. 2025. Vol. 73, no. 1. P. 35–52. <https://doi.org/10.61089/aot2025.v5vdb115>
4. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: Performance and critical issues // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241.
5. Oda N., Nishimura S. Vibration of air suspension bogies and their design // Bulletin of JSME. 1970. Vol. 13, no. 55. P. 43–50.
6. Pellegrini C., Gherardi F., Spinelli D., Saporito G., Romani M. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: Modeling of the secondary air springs and effects on calculation results // Vehicle System Dynamics. 2006. Vol. 44, suppl. 1. P. 433–442. <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>
7. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail vehicle to identify the vehicle model parameters // Journal of Rail and Rapid Transit. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>
8. Berg M. A three-dimensional air spring model with friction and orifice damping // Vehicle System Dynamics. 1999. Vol. 33, suppl. 1. P. 528–539. DOI: 10.1080/00423114.1999.12063109.
9. Docquier N., Fisette P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions // Vehicle System Dynamics. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>
10. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z. Research on theoretical calculation model for dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008. P. 2–7. DOI: [10.1109/VPPC.2008.4677717](https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677717)

11. Li H., Guo K., Chen S., Wang W., Cong F. Design of stiffness for air spring based on ABAQUS // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. Art. ID, P. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/528218>
12. Weimin Y., Canhui C., Yaling C., Yansha R. Finite element analysis of an air spring for automobile suspension // *Journal of Beijing University of Chemical Technology*. 2004. Vol. 31, no. 1. P. 105–109.
13. Wenku S., Wan J., Ying H., Weimin Y., Hao Y., Zubin L. Finite element analysis of an air spring concerning initial pressure and parameters of cord fabric layer // *Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications (PACIIA)*. 2009. DOI: [10.1109/PACIIA.2009.5406380](https://doi.org/10.1109/PACIIA.2009.5406380)
14. Sun J. Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM // *4th ANSA & μETA International Conference*. 2011. P. 68–72.
15. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sysyn M., Sobolevska Y. Influence of the geometric parameters of the connecting pipeline on the stiffness and damping of the pneumatic spring suspension at high-speed rolling stock // *Vehicle System Dynamics*. 2024. P. 1–22. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2425022>

References

1. Bozhok N. O. Napriamky vprovadzhennia shvydkisnykh pasazhyrskykh perevezen v Ukraini // *Problemy ekonomiky transportu: zb. nauk. pr. Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazariana*. 2013. № 5. S. 46–56.
2. Kuzyshyn A., Sobolevska J., Kostitsa S., Batig A., Boiarko V. Mathematical modeling of the second stage of spring suspension of high-speed rolling stock // *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2684, no. 1. Art. 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0120402>
3. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Royko Y., Kravets I., Sobolevska Y., Boikiv M. Methodology for evaluating the dynamic parameters of the rubber-cord shell of a high-speed rolling stock pneumatic spring in the wheel–frog interaction of a railroad switch // *Archives of Transport*. 2025. Vol. 73, no. 1. P. 35–52. <https://doi.org/10.61089/aot2025.v5vdb115>
4. Mazzola L., Berg M. Secondary suspension of railway vehicles – air spring modelling: Performance and critical issues // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2012. Vol. 228, no. 3. P. 225–241.
5. Oda N., Nishimura S. Vibration of air suspension bogies and their design // *Bulletin of JSME*. 1970. Vol. 13, no. 55. P. 43–50.
6. Pellegrini C., Gherardi F., Spinelli D., Saporito G., Romani M. Wheel–rail dynamic of DMU IC4 car for DSB: Modeling of the secondary air springs and effects on calculation results // *Vehicle System Dynamics*. 2006. Vol. 44, suppl. 1. P. 433–442. <https://doi.org/10.1080/00423110600872960>
7. Aizpun M., Vinolas J., Alonso A. Using the stationary tests of the acceptance process of a rail

- vehicle to identify the vehicle model parameters // *Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013. Vol. 228, no. 4. P. 408–421. <https://doi.org/10.1177/0954409713478592>
8. Berg M. A three-dimensional air spring model with friction and orifice damping // *Vehicle System Dynamics*. 1999. Vol. 33, suppl. 1. P. 528–539. DOI: 10.1080/00423114.1999.12063109.
9. Docquier N., Fisette P., Jeanmart H. Multiphysic modelling of railway vehicles equipped with pneumatic suspensions // *Vehicle System Dynamics*. 2007. Vol. 45, no. 6. P. 505–524. <https://doi.org/10.1080/00423110601050848>
10. Sihong Z., Jiasheng W., Ying Z. Research on theoretical calculation model for dynamic stiffness of air spring with auxiliary chamber // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2008. P. 2–7. DOI: [10.1109/VPPC.2008.4677717](https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677717)
11. Li H., Guo K., Chen S., Wang W., Cong F. Design of stiffness for air spring based on ABAQUS // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. Art. ID, P. 1–5. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/528218>
12. Weimin Y., Canhui C., Yaling C., Yansha R. Finite element analysis of an air spring for automobile suspension // *Journal of Beijing University of Chemical Technology*. 2004. Vol. 31, no. 1. P. 105–109.
13. Wenku S., Wan J., Ying H., Weimin Y., Hao Y., Zubin L. Finite element analysis of an air spring concerning initial pressure and parameters of cord fabric layer // *Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications (PACIIA)*. 2009. DOI: [10.1109/PACIIA.2009.5406380](https://doi.org/10.1109/PACIIA.2009.5406380)
14. Sun J. Calculation of vertical stiffness of air spring with FEM // *4th ANSA & μETA International Conference*. 2011. P. 68–72.
15. Kuzyshyn A., Kovalchuk V., Sysyn M., Sobolevska Y. Influence of the geometric parameters of the connecting pipeline on the stiffness and damping of the pneumatic spring suspension at high-speed rolling stock // *Vehicle System Dynamics*. 2024. P. 1–22. <https://doi.org/10.1080/00423114.2024.2425022>

Kuzyshyn, A. Ya. Study of the temperature operating regime of a pneumatic suspension spring of high-speed railway rolling stock

The increase in operating speeds of railway rolling stock leads to higher requirements for the reliability of pneumatic suspension components, in particular rubber-cord shells of air springs, whose thermal condition significantly affects their durability and performance characteristics. This paper presents the results of a comprehensive study of the thermal operating regime of an air spring used in high-speed rolling stock under variable service loads. The features of air temperature variation in the air spring during thermodynamic compression and expansion processes arising from vertical oscillations of the car body and bogies of high-speed rolling stock are

considered. The influence of operational factors on the development of thermal processes in the air spring is analyzed, and the patterns of air temperature fluctuations depending on train speed, amplitude of vertical track irregularities, and car body load are determined. The study is based on a thermodynamic model of air spring operation. A comparative analysis of the thermal regime under tare and gross load conditions is performed; the maximum values of air temperature variation are determined, and their relative differences are evaluated. It is established that the difference in the maximum air temperature variation between the considered operating modes does not exceed 5.5%, indicating a negligible influence of car body mass on the thermal operating regime of the air spring. The obtained results can be used to refine the thermal operating conditions of the rubber–cord shell of the air spring, as well as in further studies of the dynamic characteristics of pneumatic suspension systems of high-speed railway rolling stock. Practical implementation of the results contributes to improving the reliability and durability of air springs by stabilizing their thermal regime and reducing thermal loads

on the rubber–cord shell. The application of the obtained data enables a substantiated assessment of the technical condition of air springs, optimization of maintenance intervals and scope, and minimization of the probability of failures of individual components during high-speed operation. This is an important factor in ensuring reliable, uninterrupted, and safe operation of railway transport.

Keywords: high-speed rolling stock, air spring, thermal process, temperature, travel speed, track irregularity

Кузишин Андрій Ярославович – доктор філософії (PhD), доцент кафедри «Залізничний транспорт», Національний університет «Львівська політехніка», науковий співробітник лабораторії залізнично-транспортних досліджень, Львівський науково-дослідний інститут судових експертиз м. Львів, andrii.y.kuzyshyn@lpnu.ua

Стаття подана 02.11.2025.

Наукове видання

**ВІСНИК
СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
№ 12 (298) 2025**

Науковий журнал

Відповідальний за випуск

Лорія М.Г.

Оригінал-макет

Могильна О.В.

Статті надруковано в авторській редакції

Підписано до друку 29.01.2026 р.
Формат 60 x 84 1/8. Папір офсетний. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 11,2. Обл.-вид. арк. 12,9.
Наклад 50 прим. Вид. № 3434.

Видавництво
Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Свідцтво 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